

高等职业教育电子信息类贯通制教材（电子技术专业）

# 电子测量与仪器

## （第2版）

宋悦孝 主编  
张 伟 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书可作为高职、高专院校或中等职业学校电子类、电气类、自动化类、机电类和其他相近专业的教材。本书分为9章,第1章主要介绍电子测量方法、电子测量仪器的分类与发展,电子测量数据处理与测量结果的表示;第2章主要介绍常用信号发生器的工作原理、技术指标与应用;第3~8章主要介绍电压、频率、时间、相位、电子元器件参数、频域信号、数据域信号等的测量方法,以及测试仪表的工作原理、技术指标与应用;第9章主要介绍独立智能仪器的基本组成、典型处理功能与应用,以及自动测试系统、个人仪器、虚拟仪器的基本组成等。

本书还配有教学指南、电子教案及习题答案(电子版),以方便教学使用,详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子测量与仪器 / 宋悦孝主编. —2 版. —北京:电子工业出版社, 2009.2

高等职业教育电子信息类贯通制教材·电子技术专业

ISBN 978-7-121-06918-5

I. 电… II. 宋… III. ①电子测量—高等学校:技术学校—教材 ②电子测量设备—高等学校:技术学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 088037 号

策划编辑:李光昊

责任编辑:李光昊

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:400 千字

印 次:2009 年 2 月第 1 次印刷

定 价:23.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010) 88258888。

# 前言



本书是在第 1 版的基础上,根据目前职业教育的特点,从电子测量与仪器的实际应用出发,通过对内容的总结提高、修改增删而成的,使本书内容更加合理实用、更加符合教学规律、更加突出职教特色。主要做了如下几方面的修订。

(1) 从本课程的教学目的和任务出发,对内容精心提炼,删除了电子测量特点介绍等内容,增加了 AT6011 型频谱仪实例、示波器双扫描显示等内容。

(2) 根据目前职业教育的特点,对内容进行了更加合理的编排,例如第 1 章,使之更符合教学规律。

(3) 从职业学校人才培养目标出发,增加了电子测量术语实际称呼说明,使内容更加贴近生产实践,避免引起概念混淆,例如,增加了对示波器 V/DIV 称呼等的说明。

(4) 为了方便教学,增加了参考实验与课程设计,更有利于组织教学与自学。

(5) 为了增强学生岗位竞争力,提高工作适应能力,对教材中引用的英文缩写均给出英文全称。

参加本书修订的有宋悦孝(第 1、3、4 章)、韩敬东(第 2、5 章)、李耀明(第 8、9 章)、陈兆梅(第 6 章、附录)、张文(第 7 章)。本书由宋悦孝担任主编,由张伟教授主审。在修订过程中得到了李克教授和部分生产厂家的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

在本书第 1 版使用期间,不少兄弟院校师生提出了许多宝贵意见和建议,在此深表谢意!

为了方便教师教学,本书还配有教学指南、电子教案及习题答案(电子版),请有此需要的教师登录华信教育资源网(<http://www.huaxin.edu.cn> 或 <http://www.hxedu.com.cn>)免费注册后再进行下载,如有问题,请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系(E-mail:[hxedu@phei.com.cn](mailto:hxedu@phei.com.cn))。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在错误或不当之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录



第 1 章 电子测量与仪器的基础知识 .....	1
1.1 电子测量概述 .....	1
1.1.1 电子测量的意义及内容 .....	1
1.1.2 电子测量方法 .....	2
1.2 测量误差的基本概念 .....	3
1.2.1 测量误差的表示方法 .....	3
1.2.2 测量误差的来源 .....	5
1.2.3 测量误差的分类 .....	6
1.3 电子测量仪器的基础知识 .....	8
1.3.1 电子测量仪器的发展 .....	8
1.3.2 电子测量仪器的分类 .....	9
1.3.3 电子测量仪器的主要技术指标 .....	10
1.3.4 电子测量仪器的误差 .....	11
1.4 测量结果的表示及测量数据的处理 .....	12
1.4.1 测量结果的表示 .....	12
1.4.2 有效数字的处理 .....	13
1.4.3 测量数据的处理 .....	15
本章小结 .....	15
习题 1 .....	16
第 2 章 测量用信号发生器 .....	17
2.1 概述 .....	17
2.1.1 信号发生器的分类 .....	17
2.1.2 信号发生器的主要性能指标 .....	18
2.1.3 信号发生器的一般组成 .....	19
2.2 正弦信号发生器 .....	20
2.2.1 低频信号发生器 .....	20
2.2.2 高频信号发生器 .....	24
2.2.3 合成信号发生器 .....	27
2.3 函数信号发生器 .....	29
2.3.1 工作原理及结构 .....	29
2.3.2 AS101D 型函数信号发生器简介 .....	31

2.4	脉冲信号发生器	33
2.4.1	分类	34
2.4.2	工作原理与主要性能指标	34
2.4.3	脉冲信号发生器的使用	35
	本章小结	37
	习题 2	37
<b>第 3 章</b>	<b>电压测量与电压表</b>	<b>38</b>
3.1	概述	38
3.1.1	电压测量的基本要求	38
3.1.2	交流电压的表征	39
3.1.3	电子电压表的分类	41
3.2	直流电流、直流电压的测量	43
3.2.1	直流电流的测量	43
3.2.2	直流电压的测量	44
3.3	模拟式交流电压表	44
3.3.1	均值电压表	45
3.3.2	峰值电压表	47
3.3.3	有效值电压表	51
3.3.4	模拟式电压表实例	52
3.3.5	使用方法及注意事项	53
3.4	数字电压表	54
3.4.1	主要性能指标	54
3.4.2	A/D 变换器	57
3.4.3	直流数字电压表实例	62
	本章小结	63
	习题 3	64
<b>第 4 章</b>	<b>波形测试与仪器</b>	<b>65</b>
4.1	概述	65
4.2	波形测试的基本原理	66
4.2.1	阴极射线示波管	66
4.2.2	波形显示原理	67
4.3	通用示波器的基本组成及性能指标	69
4.3.1	基本组成	69
4.3.2	主要性能指标	70
4.4	通用示波器 Y 通道（垂直系统）	72
4.4.1	输入电路	72
4.4.2	前置放大器	74
4.4.3	延迟级	74
4.4.4	输出放大器	76

4.5	通用示波器 X 通道（水平系统）	76
4.5.1	触发电路	76
4.5.2	扫描电路	78
4.5.3	X 放大器	81
4.6	示波器的多波形显示	81
4.6.1	双踪显示	82
4.6.2	双扫描显示	83
4.7	示波器的选择使用	85
4.7.1	示波器的选用	85
4.7.2	示波器的正确使用	86
4.8	示波器的应用	90
4.8.1	测量电压	90
4.8.2	测量时间	92
4.8.3	测量相位差	93
4.8.4	测量频率	94
4.8.5	测量调幅系数	95
4.9	取样示波器	97
4.9.1	工作原理	97
4.9.2	组成	98
4.9.3	主要性能指标	99
4.10	数字存储示波器	100
4.10.1	工作原理	100
4.10.2	工作方式	101
4.10.3	显示方式	102
	本章小结	103
	习题 4	104
<b>第 5 章</b>	<b>频域测量与仪器</b>	<b>106</b>
5.1	扫频仪的工作原理与主要性能指标	106
5.1.1	频率特性测量方法	106
5.1.2	扫频仪工作原理	106
5.1.3	产生扫频信号的方法	107
5.1.4	频标产生电路	108
5.1.5	扫频仪的主要性能指标	109
5.2	AH1254B 型宽频带扫频仪	110
5.2.1	性能指标	110
5.2.2	工作原理	110
5.2.3	面板结构图	111
5.2.4	扫频仪的检查、校正及使用	113
5.2.5	扫频仪的应用	114

5.2.6 高频阻抗的测量 .....	116
5.3 频谱仪 .....	117
5.3.1 工作原理 .....	117
5.3.2 组成实例 .....	119
5.3.3 主要性能指标解析 .....	119
5.4 频谱仪的使用 .....	120
5.4.1 使用注意事项 .....	120
5.4.2 频谱仪的操作与使用 .....	121
5.4.3 频谱仪的应用 .....	124
本章小结 .....	125
习题 5 .....	126
<b>第 6 章 电子元器件测量与仪器 .....</b>	<b>127</b>
6.1 概述 .....	127
6.2 伏安法及数字化测量 .....	128
6.2.1 伏安法 .....	128
6.2.2 阻抗的数字化测量 .....	129
6.3 电桥法测量集中参数元件 .....	131
6.3.1 交流电桥 .....	131
6.3.2 不平衡电桥 .....	136
6.4 谐振法测量集中参数元件 .....	137
6.4.1 Q 表的组成及工作原理 .....	137
6.4.2 测量电感 .....	138
6.4.3 测量电容 .....	139
6.4.4 Q 表实例及使用方法 .....	140
6.5 晶体管特性图示仪及应用 .....	141
6.5.1 晶体管特性图示仪的组成 .....	142
6.5.2 阶梯波信号源 .....	144
6.5.3 晶体管特性图示仪的使用 .....	145
6.5.4 晶体管特性图示仪特性曲线测试举例 .....	148
本章小结 .....	150
习题 6 .....	150
<b>第 7 章 频率和时间测量与仪器 .....</b>	<b>152</b>
7.1 概述 .....	152
7.1.1 无源测频法 .....	152
7.1.2 比较测频法 .....	154
7.2 电子计数器概述 .....	155
7.2.1 分类 .....	155
7.2.2 基本组成 .....	156
7.2.3 主要性能指标 .....	157

7.3	通用电子计数器的测量功能	158
7.3.1	测量频率	158
7.3.2	测量周期	159
7.3.3	测量频率比	159
7.3.4	测量累加计数	160
7.3.5	测量时间间隔	160
7.3.6	自检（自校）	161
7.4	电子计数器的测量误差	162
7.4.1	测量误差的来源	162
7.4.2	测量误差的分析	164
7.4.3	频率扩展技术	164
7.5	通用计数器实例	165
7.5.1	性能指标	165
7.5.2	工作原理	166
7.5.3	电子计数器的使用及注意事项	167
7.6	数字相位计	167
7.6.1	瞬时值数字相位计	168
7.6.2	平均值数字相位计	169
	本章小结	170
	习题 7	170
<b>第 8 章</b>	<b>数据域测量与仪器</b>	<b>172</b>
8.1	数据域测量的基本概念	172
8.1.1	数据域测量的特点	172
8.1.2	数字信号与数字系统的特点	172
8.1.3	数据域测试仪器设备	173
8.1.4	逻辑笔和逻辑夹	174
8.2	数据域测试技术	175
8.2.1	数字电路的简易测试	175
8.2.2	数据域测试方法	175
8.2.3	故障类型、故障测试及故障定位	176
8.3	逻辑分析仪	177
8.3.1	逻辑分析仪的分类	177
8.3.2	逻辑分析仪的组成	177
8.3.3	逻辑分析仪的触发方式	178
8.3.4	逻辑分析仪的显示方式	180
8.3.5	逻辑分析仪的主要性能指标与应用	183
	本章小结	186
	习题 8	187
<b>第 9 章</b>	<b>智能测试仪器与系统</b>	<b>188</b>



9.1 智能仪器概述..... 188

9.1.1 智能仪器的组成..... 188

9.1.2 GPIB 接口 ..... 189

9.1.3 智能仪器的特点 ..... 191

9.2 智能仪器的典型处理功能 ..... 192

9.2.1 硬件故障的自检功能 ..... 192

9.2.2 自动测量功能..... 192

9.3 智能仪器实例——智能化 DVM 简介..... 194

9.3.1 概述 ..... 194

9.3.2 典型智能 DVM 介绍..... 197

9.4 自动测试系统、个人仪器与虚拟仪器 ..... 203

9.4.1 自动测试系统..... 203

9.4.2 个人仪器及系统..... 204

9.4.3 虚拟仪器 ..... 206

本章小结..... 207

习题 9..... 208

附录..... 209

附录 A 实验指导书..... 209

附录 B 课程设计指导书——数字电压表课程设计 ..... 232

参考文献 ..... 239

# 第 1 章 电子测量与仪器的基础知识



**学习参考：**本章主要讲述电子测量与仪器的基本知识，要求通过本章的学习了解电子测量的方法、电子测量仪器的分类与主要性能指标、测量结果的表示、测量数据的处理，灵活掌握电子测量误差的表示方法及分类，掌握有效数字的处理。

**本章要点：**电子测量的方法，测量误差的表示方法与分类，有效数字的处理等。

## 1.1 电子测量概述

### 1.1.1 电子测量的意义及内容

#### 1. 电子测量的意义

测量的目的就是获得用数值和单位共同表示的被测量的结果，是人们借助于专门的设备，依据一定的理论，通过实验的方法将被测量与已知同类标准量进行比较而取得测量结果。被测量的结果必须是带有单位的有理数，例如某测量结果为  $9.3\text{V}$  是正确的，而测得的结果为  $9.3$  或  $9\frac{1}{3}\text{V}$  是错误的。

广义的电子测量是指利用电子技术进行的测量。狭义的电子测量是指对电子技术中各种电参量所进行的测量。

#### 2. 电子测量的内容

电子测量与其他测量相比，具有测量频率范围宽、量程广、精确度高、测量速度快、易于实现遥测遥控等优点。电子测量已被广泛应用于各个领域，大到天文观测、航空航天，小到物质结构、基本粒子，无不运用电子测量技术。狭义电子测量的内容主要包括如下几个方面。

##### (1) 能量的测量

能量的测量指的是对电流、电压、功率、电场强度等参量的测量。

##### (2) 电路参数的测量

电路参数的测量指的是对电阻、电感、电容、阻抗、品质因数等参量的测量。

##### (3) 信号特性的测量

信号特性的测量指的是对频率、周期、时间、相位、调制系数、失真度等参量的测量。

##### (4) 电子设备性能的测量

电子设备性能的测量指的是对通频带、选择性、放大倍数、衰减量、灵敏度、信噪比等参量的测量。



### （5）特性曲线的测量

特性曲线的测量指的是对幅频特性、相频特性、器件特性等特性的测量。

上述各种参量中，频率、时间、电压、相位、阻抗等是基本参量，其他的为派生参量，基本参量的测量是派生参量测量的基础。电压测量则是最基本、最重要的测量内容。

非电量的测量属于广义电子测量的内容，可以通过传感器将非电量变换为电量后进行测量。本书主要讨论狭义电子测量内容。

## 1.1.2 电子测量方法

为了达到测量目的，正确选择测量方法是极其重要的，它直接关系到测量工作的正常进行和测量结果的有效性。测量方法的分类主要有以下几种方法。

### 1. 按照测量性质分类

按照测量性质分类，测量方法有时域测量、频域测量、数字域测量和随机量测量四种。

#### （1）时域测量

时域测量是指测量与时间有函数关系的量。如电压、电流等，它们的稳态值和有效值一般可以用仪表直接测量，而瞬时值可用示波器通过显示的波形来观测。

#### （2）频域测量

频域测量是指测量与频率有函数关系的量。如电路增益、相移等，可以通过分析电路的幅频和相频特性或频谱特性等进行测量。

#### （3）数字域测量

数字域测量是指对数字逻辑量进行的测量。如用逻辑分析仪可以同时观测许多单次并行数据。对于计算机的地址线、数据线上的信号，既可显示其时序波形，也可用“1”或“0”显示其逻辑状态。

#### （4）随机量测量

随机量测量主要是指对各种噪声、干扰信号等随机量的测量。

### 2. 按照测量手段分类

按照测量手段分类，测量方法有直接测量、间接测量、组合测量等方法，间接测量与组合测量同属于非直接测量方法。

#### （1）直接测量

直接测量是指借助于测量仪器等设备可以直接获得测量结果的测量方法，例如用电压表测电压等。

#### （2）间接测量

间接测量是指对几个与被测量有确定函数关系的物理量进行直接测量，然后通过公式计算或查表等求出被测量的测量方法。伏安法测量电阻  $R$  的方法即属于间接测量法，它是先测出流过电阻的电流  $I$  及电阻两端的电压  $U$  后，再利用公式  $R = U/I$  来测量电阻值  $R$  的。

#### （3）组合测量

组合测量是建立在直接测量和间接测量基础上的测量方法。当无法通过直接测量或间接测量得出被测量的结果时，需要改变测量条件进行多次测量，然后按照被测量与有关未知量间的函数关系组成联立方程组，求解方程组得出有关未知量，最后将未知量代入函数式而得



出测量结果。例如,测量在任意环境温度  $t^{\circ}\text{C}$  时某电阻的阻值,已知任意温度下电阻阻值的计算式为:

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2$$

式中,  $R_t$ 、 $R_{20}$  分别为环境温度为  $t^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻值;  $\alpha$ 、 $\beta$  为电阻温度系数,  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $R_{20}$  均为不受温度影响的未知量。

显然,可以利用直接测量或间接测量的方法测出某温度下电阻的阻值,而以直接测量或间接测量法测出任意温度下电阻阻值是不现实的。如果改变测试温度,分别测出三种不同温度下的电阻值,代入上述公式,求解由此得到的联立方程组得出未知量  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $R_{20}$  后,代入上式即可得出任意温度下电阻的阻值。

电子测量的方法还有很多,如人工测量和自动测量;动态测量和静态测量;精密测量和工程测量;低频测量、高频测量和超高频测量等。

测量时应对被测量的物理特性、测量允许时间、测量精度要求以及经费情况等方面进行综合考虑,结合现有的仪器、设备条件,择优选取合适的测量方法。

## 1.2 测量误差的基本概念

测量的目的是得到被测量的真实结果,即真值。但由于人们对客观规律认识的局限性,不可能得到被测量的真值。测量值与被测量真值之间的差异称为测量误差。

### 1.2.1 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有三种:绝对误差、相对误差和允许误差。

#### 1. 绝对误差

##### (1) 定义

被测量的测量值  $x$  与真值  $A_0$  之差称为绝对误差,用  $\Delta x$  表示,即

$$\Delta x = x - A_0$$

式中,  $x$  为被测量的给出值、示值或测量值,习惯上统称为示值,  $A_0$  为被测量的真值。

注意,示值和仪器的读数是有区别的,读数是从仪器刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数据,而示值则是由仪器刻度盘、显示器上的读数经换算而得到的。

真值  $A_0$  是一个理想的概念,实际上是不可能得到的,通常用高一级标准仪器所测得的测量值  $A$  来代替,称之为被测量的实际值。绝对误差的计算式为

$$\Delta x = x - A$$

绝对误差的正负号表示测量值偏离实际值的方向,即偏大或偏小。绝对误差的大小则反映出测量值偏离实际值的程度。

##### (2) 修正值

与绝对误差大小相等、符号相反的量值称为修正值,用  $C$  表示,即

$$C = -\Delta x = A - x$$

修正值通常是在用高一级标准仪器对测量仪器校准时给出的。当得到测量值  $x$  后,要对测量值  $x$  进行修正以得到被测量的实际值,即

$$A = C + \Delta x$$



修正值有时给出的方式不一定是具体数值,也可能是一条曲线或一张表格,和绝对误差一样都有大小、符号及量纲。

## 2. 相对误差

虽然绝对误差可以说明测量结果偏离实际值的情况,但不能确切反映测量结果偏离实际值的程度,为了克服绝对误差的这一不足,通常采用相对误差的形式来表示。

相对误差包括实际相对误差、示值相对误差和满度相对误差。

### (1) 实际相对误差

绝对误差 $\Delta x$ 与实际值 $A$ 之比,称为实际相对误差,用 $\gamma_A$ 表示为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\%$$

### (2) 示值相对误差

绝对误差 $\Delta x$ 与测量值 $x$ 之比,称为示值相对误差,用 $\gamma_x$ 表示为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

### (3) 满度相对误差

绝对误差 $\Delta x$ 与仪器满度值 $x_m$ 之比,称为满度相对误差或引用相对误差,简称为满度误差或引用误差,用 $\gamma_m$ 表示。它是为了描述电工仪表的准确度等级而引入的相对误差,计算式为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-1)$$

指针式电工仪表的准确度等级通常分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0共七级,分别表示仪表满度相对误差所不超过的百分比。如某型万用表面板上的“~5.0”,表示该型万用表测量交流量时的满度相对误差为 $\pm 5.0\%$ ,在无标准仪表比对的情况下,是不可能确定测量值偏离方向的,所以应带有“ $\pm$ ”号。

由式(1-1)计算出的绝对误差是用该仪表测量时可能产生的最大误差 $\Delta x_m$ ,即

$$\Delta x_m = x_m \gamma_m$$

实际测量的绝对误差 $\Delta x$ 应满足

$$\begin{aligned} \Delta x &\leq \Delta x_m \\ \gamma_x &\leq \frac{\Delta x_m}{x} \end{aligned}$$

可见,对于同一仪表,所选量程不同,可能产生的最大绝对误差也不同。而对于同一量程,在无修正值可以利用的情况下,在不同示值处的绝对误差一般按最坏的情况处理,即认为仪器在同一量程各处的绝对误差是常数且等于 $\Delta x_m$ 。所以当仪表准确度等级选定后,一般情况下,测量值越接近满度值时,测量相对误差越小,测量越准确。

因此,在一般情况下,应尽量使指针处在仪表满度值的三分之二以上区域。但该结论只适用于正向线性刻度的一般电工仪表。对于万用表电阻挡等非线性刻度电工仪表,应尽量使指针处于满度值的1/2或1/2以下区域。

相对误差只有大小和符号,没有单位。

**【例 1-1】**已知用电压表校准万用表时测得的两个电压值分别是100V、50V,而用万用表测得的值分别是90V、40V,求两次测量的绝对误差、修正值、实际相对误差分别是多少?



解：根据题意知， $U_{A1}=100\text{V}$ ， $U_{A2}=50\text{V}$ ， $U_{x1}=90\text{V}$ ， $U_{x2}=40\text{V}$ 。

第一次测量： $\Delta U_1=90\text{V}-100\text{V}=-10\text{V}$

$$C_1=-\Delta U_1=10\text{V}$$

$$\gamma_{A1}=\Delta U_1/U_{A1}\times 100\%=-10\text{V}/100\text{V}\times 100\%=-10\%$$

第二次测量： $\Delta U_2=40\text{V}-50\text{V}=-10\text{V}$

$$C_2=-\Delta U_2=10\text{V}$$

$$\gamma_{A2}=\Delta U_2/U_{A2}\times 100\%=-10\text{V}/50\text{V}\times 100\%=-20\%<\gamma_{A1}$$

由此可见，第一次测量要比第二次测量准确。由于被测量的实际值是确定的，所以绝对误差的计算式中只有“-”，而无“±”。

**【例 1-2】**如果要测量一个 40V 左右的电压，现有两块电压表，其中一块量程为 50V、1.5 级，另一块量程为 100V、1.0 级，问应选用哪一块表测量比较合适？

解：根据题意，因为要测量的是同一个被测量，故只要比较两块表测量时产生的绝对误差即可。

第一块电压表测量的绝对误差为

$$\Delta U_1\leq 50\text{V}\times (\pm 1.5\%)=\pm 0.75\text{V}$$

第二块电压表测量的绝对误差为

$$\Delta U_2\leq 100\text{V}\times (\pm 1.0\%)=\pm 1.0\text{V}>\Delta U_1$$

答：应选用第一块电压表测量。

### 3. 允许误差

一般情况下，线性刻度电工仪表的指示装置对它的测量结果影响比较大，但因其指示装置构造的特殊性，使得无论测量值是多大，产生的误差总是比较均匀的，所以线性刻度电工仪表的准确度通常用满度相对误差表示。而对于结构较复杂的电子测量仪器来说，由某一部分产生极小的误差，就有可能由于累积或放大等原因而产生很大的误差，因此不能用满度相对误差而用允许误差来表示它的准确度等级。

允许误差又称为极限误差或仪器误差，是人为规定的某类仪器测量时不能超过的测量误差的极限值，可以用绝对误差、相对误差或二者的结合来表示。例如，某一数字电压表基本量程的误差为 $\pm 0.006\%U_x\pm 0.0003\text{V}$ ， $U_x$ 为读数值，它是用绝对误差和相对误差的组合来表示的。

#### 1.2.2 测量误差的来源

产生测量误差的原因是多方面的，主要来源包括以下几类。

##### (1) 仪器误差

仪器误差是由于仪器本身及其附件的电气和机械性能不完善而引起的误差。如由于仪器零点漂移、刻度非线性等引起的误差。

##### (2) 使用误差

使用误差又称为操作误差，是由于安装、调节、使用不当等原因引起的误差。如测量时由于阻抗不匹配等原因引起的误差。

##### (3) 人身误差

人身误差是由于人为原因而引起的误差，如读错数据等。



#### （4）环境误差

环境误差又称为影响误差，是由于仪器受到外界的温度、湿度、气压、震动等影响而产生的误差。如数字电压表性能指标中常单独给出的温度影响误差。

#### （5）方法误差

方法误差又称为理论误差，是由于测量时使用的方法不完善、所依据的理论不严格等原因引起的误差。例如，在图 1.1 中，由于电流表测得的电流还包括流过电压表内阻的电流，所以电阻的测量值要比电阻实际值小，由此产生的误差属于方法误差。

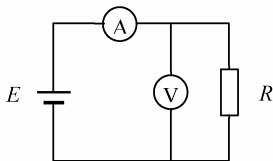


图 1.1 伏安法测量电阻

测量工作中，应对误差来源进行认真分析，采取相应的措施减小误差源对测量结果的影响，提高测量准确度。

### 1.2.3 测量误差的分类

根据测量误差的性质和特点，测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

#### 1. 系统误差

##### （1）定义

在规定的测量条件下，对同一量进行多次测量时，如果测量误差能够保持恒定或按照某种规律变化，则这种误差称为系统误差或确定性误差，简称为系差。如电表零点不准，温度、湿度、电源电压变化等引起的误差。

##### （2）分类与判断

系统误差根据其性质特征的不同分为恒定系统误差和变值系统误差。

① 恒定系统误差简称为恒定系差，误差的大小及符号在整个测量过程中始终保持恒定不变。

② 变值系统误差简称为变值系差，误差的大小及符号在测量过程中会随测试的某个或某几个因素按照累进性规律、周期性规律或某一复杂规律等确定的函数规律变化。

具有累进性规律的变值系差称为累进性系差，

图 1.2 (a) 和图 1.2 (b) 所示的累进性系差分别具有线性递增和线性递减的规律， $\Delta u_i$  为每次测量的误差， $i$  为测量次数。

具有周期性规律的变值系差称为周期性系差。

按照某一复杂规律变化的变值系差称为按复杂规律变化的系差。

系统误差的发现和判断除了可以用理论分析法、校准和比对法、改变测量条件法、公式判断法外，比较简单的是剩余误差观察法。

剩余误差  $v_i$  是单次测量值与多个测量值的算术平均值的差，即  $\Delta x_i$ ，具体内容参见 1.4.3。剩余误差观察法根据剩余误差大小、符号的变化规律，来判断有无系差和系差类型，如图 1.3 所示。图 1.3 (a) 表明剩余误差大致上正负相同，无明显变化规律，可以认为不存在系差；图 1.3 (b) 说明剩余误差呈现线性递增的规律，可以认为存在累进性系差；图 1.3 (c) 表明剩余误差大小、符号呈现周期性变化，可以认为存在周期性系差。

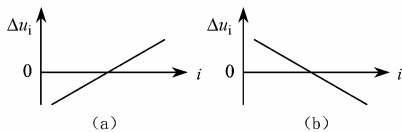


图 1.2 累进性系差

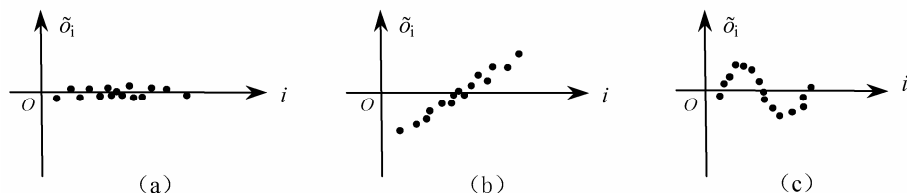


图 1.3 系差的判断

### (3) 系统误差与测量的关系

系统误差表明的是测量结果偏离真值或实际值的程度，即系统误差越小，测量准确度越高。系统误差通常能够出现在最终的测量结果中。

### (4) 减小系统误差的方法

系统误差通常是由那些对测量影响显著的因素产生的。为了减小系统误差，在测量之前应尽量发现并消除可能产生系统误差的来源及其影响，测量中则应采用适当的方法，如零示法、替代法、交换法、微差法等，或引入修正值加以抵消或削弱。

① 零示法是在测量中使被测量对指示仪表的作用与某已知的标准量对它的作用相互平衡，以使指示仪表表示零，这时被测量等于已知的标准量。零示法可以消除指示仪表不准而造成的误差，如天平称量物体质量等。

② 替代法即置换法，是在测量条件不变的情况下，用一个已知标准量去代替被测量，并调整标准量使仪器的示值不变，此种情况下，被测量等于调整后的标准量。例如，在图 1.4 用直流电桥测量直流电阻的过程中，先接入电阻  $R_x$  使电桥处于平衡（电流表指示为 0）。再用  $R_s$  替代  $R_x$ ，调节  $R_s$  使电桥再次平衡，此时  $R_s$  与  $R_x$  相等。

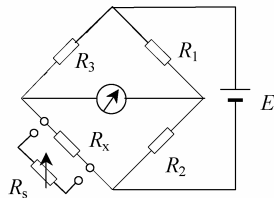


图 1.4 直流平衡电桥测量直流电阻

由于在替代的过程中，仪器状态和示值都不变，所以仪器误差和其他造成系统误差的因素对测量结果基本不产生影响。

③ 交换法即对照法，是利用交换被测量在测量系统中的位置或测量方向等，设法使两次测量中误差源对被测量的作用相反，取两次测量值的平均值作为测量结果。

交换法将大大削弱系统误差的影响，例如，用旋角度盘读数时，分别将度盘向右旋转和向左旋转进行两次读数，并取读数的平均值作为最后结果，这样可以减小传动结构的机械间隙所产生的误差。

④ 微差法又称为虚零法或差值比较法，它实质上是一种不彻底的零示法。在零示法中需要仔细调节标准量  $s$  使之与被测量  $x$  相等，其操作费时费力，甚至不可能做到。微差法允许标准量  $s$  与被测量  $x$  的效应不完全抵消，而是相差一微小量  $\delta$ ，测得  $\delta = x - s$ ，即可得到被测量  $x$

$$x = s + \delta$$

$x$  的示值相对误差为

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta s}{x} + \frac{\Delta \delta}{x} = \frac{\Delta s}{s + \delta} + \frac{\delta}{x} \cdot \frac{\Delta \delta}{\delta}$$

由于  $\delta \ll s$ ，所以  $s + \delta \approx s$ ，又因  $\delta \ll x$ ，所以





$$\frac{\Delta x}{x} \approx \frac{\Delta s}{s}$$

即被测量相对误差近似等于标准量相对误差，而仪表产生的偏差 $\Delta\delta/\delta$ 几乎可以忽略。

2. 随机误差

随机误差又称为偶然误差或残差，简称为随差，是指在一系列重复测量中，每次测量结果出现无规律随机变化的误差。随机误差反映了测量结果的离散性，即随机误差越小，测量精密度越高。

随机误差主要由那些影响微弱、变化复杂而又互不相关的多种因素共同造成的。在足够多次测量中，随机误差服从一定的统计规律，即误差小的出现的概率高，误差大的出现的概率低，而且大小相等的正负误差出现的概率相等。因此，采用多次测量求平均的方法可以削除或削弱随机误差。一般认为，只要测量次数足够多，随机误差的影响就足够小。随机误差可以出现在单次测量结果中，一般不会出现最终结果中。

注意，测量准确度和测量精密度之间没有必然的联系，如图 1.5 所示，A 为被测量真值， $x_i$  为单次测量值。图 1.5 (a) 表明测量准确度高而精密度低。如果系差和随差都小，则测量准确度和精密度都高，称为测量精确度或精度高，如图 1.5 (b) 所示。

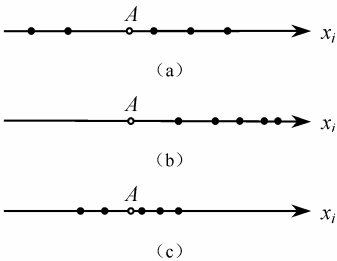


图 1.5 测量准确度、精密度与精确度

3. 粗大误差

粗大误差又称为过失误差或疏失误差，简称为粗差，是由于操作不当、测量失误等原因造成测量结果明显偏离实际值的误差。测量时应耐心细致以免出现粗大误差，如果发现数据中有粗大误差，应予剔除。

1.3 电子测量仪器的基础知识

1.3.1 电子测量仪器的发展

测量中用到的各种电子仪表、电子仪器及辅助设备统称为电子测量仪器，它的发展大致经历了模拟仪器、数字化仪器、智能仪器和虚拟仪器共四个阶段。

1. 模拟仪器

模拟仪器是出现较早、仍然比较常见的测量仪器，如指针式万用表、晶体管毫伏表等。它们的指示机构是电磁机械式的，借助指针显示测量结果。

2. 数字化仪器

数字化仪器是目前很普遍的测量仪器，如数字电压表、数字频率计等。数字化仪器将模拟信号的测量变换为数字信号的测量，并以数字形式给出测量结果，具有比模拟仪器测速快、测量准确度高、抗干扰性能好、操作方便等诸多优点。

3. 智能化仪器

智能化仪器内置微处理器，既能进行自动测试，又具有一定的数据处理功能，可取代部



分脑力劳动。智能化仪器的功能模块多以硬件（或固化的软件）形式存在，无论是开发还是应用，均缺乏一定的灵活性。

#### 4. 虚拟仪器

##### （1）虚拟仪器的基本概念

虚拟仪器（VI, Virtual Instrument）是以一种全新的理念于 20 世纪 90 年代发展起来的仪器，主要用于自动测试、过程控制、仪器设计和数据分析等。虚拟仪器强调“软件即仪器”，即在仪器设计或测试系统中尽可能用软件代替硬件，所以用户可以在通用计算机平台上，根据用户自己的需求来定义和设计仪器的测试功能，其实质是充分利用计算机的最新技术来实现和扩展传统仪器的功能。

##### （2）虚拟仪器的组成

虚拟仪器主要由计算机、仪器模块和软件三部分组成。

仪器模块的功能主要靠软件实现，通过编程在显示屏上构成信号发生器、示波器或数字万用表等传统仪器的软面板，而信号发生器产生信号的波形、频率、占空比、幅值等，以及示波器的测量通道、偏转灵敏度、时基因数、极性、触发信号等均用鼠标或按键进行设置，操作使用更加方便，而且虚拟仪器具有更强的分析处理能力。

软件技术是虚拟仪器的核心技术，常用的开发软件有 LabVIEW、LabWindows/CVI 等。以 LabVIEW 为例，它们基于图形化编程语言的开发环境，用于如 GPIB、VXI、PXI、PCI 仪器及数据采集卡等硬件的系统构成。图形化编程软件具有简单易学、灵活好用的特点。

##### （3）虚拟仪器的特点

与传统仪器相比，虚拟仪器具有高效、开放、操作简便灵活、功能强大、性价比高等优点，其特点如下。

① 智能化程度高，处理能力强。虚拟仪器的处理能力和智能化程度主要取决于仪器软件水平。用户可以根据实际应用需求，将先进的信号处理算法、人工智能技术和专家系统应用于仪器设计与集成，从而将仪器智能化水平提高到一个新的层次。

② 复用性强，费用低。用相同的硬件可构成多种不同测试功能的仪器，例如，同一个高速数字采样器，可设计出数字示波器、逻辑分析仪、计数器等多种仪器。这些仪器的功能更加灵活、高效、开放、费用更低。通过与计算机网络连接，还可实现虚拟仪器的分布式共享，更好地发挥仪器的使用价值。

③ 可操作性强，易用灵活。可由用户针对不同需要设计不同的操作显示界面，使仪器操作更加直观、简便、易于理解，而且测量结果可以直接进入数据库或通过网络发送。测量结束，还可打印、显示所需的报表或曲线，使得仪器的可操作性大大提高。

#### 1.3.2 电子测量仪器的分类

电子测量仪器种类繁多，主要包括通用仪器和专用仪器两大类。专用仪器是为特定目的专门设计制作的，适于对特定对象的测量。通用仪器是指应用面广、灵活性好的测量仪器。

按照仪器功能，通用电子测量仪器分为以下几类。

##### （1）信号发生器（信号源）

信号发生器是在电子测量中提供符合一定技术要求的电信号产生仪器，如正弦信号发生器、脉冲信号发生器、函数信号发生器、随机信号发生器等。



## （2）电压测量仪器

电压测量仪器是用于测量信号电压的仪器，如低频毫伏表、高频毫伏表、数字电压表等。

## （3）波形测试仪器

波形测试仪器是用于显示信号波形的仪器，如通用示波器、取样示波器、记忆存储示波器等。

## （4）频率测量仪器

频率测量仪器是测量信号频率、周期等的仪器，如指针式、数字式频率计等。

## （5）电路参数测量仪器

电路参数测量仪器是测量电阻、电感、晶体管放大倍数等电路参数的仪器，如电桥、Q表、晶体管特性图示仪等。

## （6）信号分析仪器

信号分析仪器是测量信号非线性失真度、信号频谱特性等的仪器，如失真度测试仪、频谱仪等。

## （7）模拟电路特性测试仪器

模拟电路特性测试仪器是分析模拟电路幅频特性、噪声特性等的仪器，如扫频仪、噪声系数测试仪等。

## （8）数字电路特性测试仪器

数字电路特性测试仪器是分析数字电路逻辑特性等的仪器，如逻辑分析仪、特征分析仪等，是数据域测量不可缺少的仪器。

测量时应根据测量要求，参考被测量与测量仪器的有关指标，结合现有测量条件及经济状况，尽量选用功能相符、使用方便的仪器。

# 1.3.3 电子测量仪器的主要技术指标

电子测量仪器的性能指标主要包括频率范围、准确度、量程与分辨力、稳定性和可靠性、环境条件、响应特性以及输入/输出特性等。

## （1）频率范围

频率范围即有效频率范围，是指能保证仪器其他指标正常工作的输入信号或输出信号的频率范围。

## （2）准确度

准确度既可用于说明测量结果与被测量真值之间的一致程度，即测量准确度，也可用于描述测量仪器给出值接近于真值的能力，即测量仪器准确度。

准确度通常以允许误差或不确定度的形式给出。不确定度是指在对测量数据进行处理的过程中，为了避免丢失真实数据而人为扩大的测量误差，是一个定量的量，由于它在一定程度上能反映出测量数据的可信程度而得名。不确定度的数值越大，丢失真实数据的可能性越小，即可信度越高。

准确度不同于允许误差和不确定度，它是一种定性的概念而非定量的量。因为准确度是通过测量结果或测量仪器给出值表明真值（或实际值）所处的范围而非确定的数值。

## （3）量程与分辨力

量程是指测量仪器的测量范围。分辨力是指通过仪器所能直接反映出来的被测量变化的最小值，即指针式仪表刻度盘标尺上最小刻度代表的被测量大小或数字仪表最低位的“1”所



表示的被测量大小。同一仪器不同量程的分辨力不同，通常以仪器最小量程的分辨力（最高分辨力）作为仪器的分辨力。

(4) 稳定性与可靠性

稳定性是指在一定的工作条件下，在规定时间内，仪器保持指示值或供给值不变的能力。可靠性是指仪器在规定的条件下，完成规定功能的可能性，是反映仪器是否耐用的一种综合性和统计性质量指标。

(5) 环境条件

环境条件即保证测量仪器正常工作的工作环境，如基准条件、正常条件、额定工作条件等。

(6) 响应特性

一般说来，仪器的响应特性是指输出的某个特征量与其输入的某个特征量之间的响应关系或驱动量与被驱动量之间的关系。例如，峰值检波器的响应特性为检波器输出的平均值  $\bar{U}$ 。约等于交流输入信号的峰值  $\hat{U}_i$ 。

(7) 输入特性与输出特性

输入特性主要包括测量仪器的输入阻抗、输入形式等。输出特性主要包括测量结果的指示方式、输出电平、输出阻抗、输出形式等。

1.3.4 电子测量仪器的误差

仪器误差是误差的主要来源之一，也是电子测量仪器的一项重要质量指标，主要包括以下几种。

(1) 固有误差

固有误差是指在基准条件（见表 1-1）下，由于仪器本身而产生的允许误差。它大致反映了仪器的最高测量精确度，通常用于仪器误差的检验和比对。例如，某数字电压表的固有误差：1kHz、1V 时为读数的  $0.4\% \pm 1$  个字。

表 1-1 国际电工委员会（IEC，International Electro Technical Commission）推荐的基准条件

影响量（影响因素）	基准数值或范围	公差
环境温度	20℃，23℃，25℃，27℃，未指明时为 20℃	±1℃
相对湿度	45%~75%	
大气压强	101kPa	
交流供电电压	额定值	±2%
交流供电频率	50Hz	±1%
交流供电波形 <sup>①</sup>	正弦波	$\beta \leq 0.05$
直流供电电压 <sup>②</sup>	额定值	$\Delta U/U_0 \leq \pm 1\%$
通风	良好	
太阳辐射效应	避免直射	
周围大气速度	0~0.2m/s	
振动	测不出	
大气中沙、尘、盐、污染气体 或水蒸气、液态水等	均测不出	
工作位置	按照制造厂规定	

①  $\beta$ 称为失真因子，交流供电波形应保持在  $(1+\beta) \sin \alpha t$  与  $(1-\beta) \sin \alpha t$  所形成的包络之内。

②  $\Delta U$  为纹波电压峰-峰值， $U_0$  为直流供电电压额定值。



## （2）基本误差

基本误差是指在正常条件（见表 1-2）下，由于仪器方面而产生的允许误差。与基准工作条件相比，仪器在正常条件下的工作环境较差。

表 1-2 IEC 推荐的正常条件

规定条件	数值或范围及其他要求	规定条件	数值或范围及其他要求
环境温度	(20±5) °C	外界电磁场干扰	应避免
相对湿度	(65±15) %	外界机械振动和冲击	应避免
大气压强	750±30mmHg	仪器负载、输入、输出功率、电压、频率等	符合技术条件的规定
交流供电电压	额定值±2%（额定值）		

## （3）工作误差

工作误差是指在仪器额定工作条件下，在任意点上求得的仪器某项特性的误差。额定工作条件包括仪器本身的全部使用范围和全部外部工作条件，是仪器不利工作环境条件的组合，产生的误差最大，通常以允许误差的形式给出；例如，某数字电压表的工作误差：50Hz～1MHz，1mV～1V 量程为±1.5%±满量程的 0.5%。

工作误差包括仪器固有误差（或基本误差）及各种因素共同作用的总效应，在说明书中必须给出，固有误差则可视情况给出。

## （4）影响误差

影响误差是当某一个影响量（即影响因素）在其额定使用范围内（或一个影响特性在其有效范围内）取任意值，而其他影响量和影响特性均处于基准条件时所测得的误差；例如，某数字电压表的温度影响误差：1kHz、1V 时的温度系数为  $10^{-4}$ ，频率影响误差：50Hz～1MHz 为±0.5%±满量程的 0.1%。

一般在某一影响量对测量影响比较大时才给出影响误差，影响误差是一种误差的极限。

## （5）稳定误差

稳定误差是仪器标准值在其他影响量和影响特性保持恒定的情况下，在规定时间内产生的误差极限。习惯上以相对误差形式给出或者注明最长连续工作时间；例如，某数字电压表的稳定误差：在温度-10～+40℃，相对湿度 20%～80%，大气压 86.7～106.7kPa 环境内，连续工作 7h。

# 1.4 测量结果的表示及测量数据的处理

## 1.4.1 测量结果的表示

测量结果一般以数字方式或图形方式等表示。图形方式可以在测量仪器的显示屏上直接显示出来，也可以通过对数据进行描点作图得到。测量结果的数字表示方法有以下几种。

### （1）测量值+不确定度

这是最常用的表示方法，特别适合表示最后测量结果。例如， $R=40.67 \pm 0.5\Omega$ ，40.67Ω 称为测量值，±0.5Ω 称为不确定度，表示被测量实际值是处于 40.17～41.17Ω 区间的任意值，但不能确定具体数据。不确定度和测量值都是在对一系列测量数据的处理过程中得到的。



## (2) 有效数字

有效数字是由第一种数字表示方法改写而成的, 比较适合表示中间结果。当未标明测量误差或分辨力时, 有效数字的末位一般与不确定度第一个非零数字的前一位对齐; 例如,  $R=40.67\pm0.5\Omega$  改写成有效数字为  $R=41\Omega$ 。

## (3) 有效数字加(1~2)位的安全数字

该方法是由前两种表示方法演变而成的, 它比较适合表示中间结果或重要数据。增加安全数字可以减小由第一种方法改写成第二种方法时产生的误差对测量的影响。该方法是在第二种表示方法确定出有效数字位数的基础上, 根据需要向后多取1~2位安全数字, 而多余数字应按照有效数字的舍入规则进行处理。例如,  $R=40.67\pm0.5\Omega$  用有效数字加1位安全数字表示为  $R=40.7\Omega$ , 末位的7为安全数字; 用有效数字加2位安全数字表示为  $R=40.67\Omega$ , 末尾的6、7为安全数字。

上述方法表示出来的结果是测量报告值。

## 1.4.2 有效数字的处理

有效数字的处理包括有效数字位数的取舍及有效数字的舍入。

### 1. 有效数字的意义

测量过程中, 通常要在量程最小刻度的基础上, 多估读一位数字作为测量值的最后一位, 此估读数字称为欠准数字。欠准数字后的数字是无意义的, 不必记入。例如, 某电压表50V量程的分辨力为1V, 如果读出32.7V是恰当的, 但不能读成32.73V。

从第一个非零数字起向右所有的数字称为有效数字。例如, 0.0430V的有效数字位数是3位而不是5位或2位, 第一个非零数字前的0仅表示小数点的位置而不是有效数字。未标明仪器分辨力时, 有效数字中非零数字后的0不能随意省略, 例如, 3000V可以写成3.000kV、 $3.000\times10^3\text{V}$ , 而不能写成3kV、3.0kV或3.00kV。

电子测量中, 如果未标明测量误差或分辨力, 通常认为有效数字具有不大于欠准数字 $\pm0.5$ 单位的误差, 称之为0.5误差原则。例如, 0.430V、0.43V表示的测量误差分别为 $\pm0.0005\text{V}$ 、 $\pm0.005\text{V}$ , 标明被测量实际值分别处于0.4295~0.4305V、0.425~0.435V之间, 因此二者表示的意义是不同的。同样道理, 3.000kV与 $3.000\times10^3\text{V}$ 表示的结果相同; 而3kV、3.0kV、3.00kV表示的结果不相同。

注意, 有的场合认为有效数字具有不大于欠准数字的 $\pm1$ 单位的误差。以后, 如无特别说明, 均以0.5误差原则为准。

### 2. 有效数字位数的取舍与运算规则

#### (1) 有效数字位数的取舍

为了不丢失被测量实际值, 在用有效数字表示测量结果时, 如果已知测量绝对误差(或不确定度), 要保证有效数字位数取舍后末位的 $\pm0.5$ 单位不小于绝对误差(或不确定度), 即有效数字位数保留至绝对误差(或不确定度)左边第1个非零数字前1位; 例如, 某被测电压测量结果为  $U_A=37.637\pm0.022\text{V}$ , 用有效数字表示为  $U_A=37.6\text{V}$ 。

若认为有效数字具有不大于欠准数字的 $\pm1$ 单位的误差, 这种情况下, 除非绝对误差(或不确定度)刚好等于某1位的 $\pm1$ 单位, 用有效数字表示时, 有效数字末位位数应与该位对齐, 例如,  $U_A=37.637\pm0.01\text{V}$  用有效数字表示为  $U_A=37.64\text{V}$ ; 否则, 有效数字位数仍保留至



绝对误差 (或不确定度) 左边第 1 个非零数字前 1 位。例如,  $U_A=37.637\pm0.011\text{V}$  用有效数字表示为  $U_A=37.6\text{V}$ 。

### (2) 有效数字的运算规则

当需要对测量数据进行运算时, 为了不使运算过于麻烦而又能正确反映测量准确度, 要对有效数字的位数进行正确的取舍。有效数字运算时, 保留的位数原则上取决于各数中精确度最差的那一项。

① 加法运算时, 以小数点后位数最少的为准; 若各项无小数点, 则以有效数字位数最少者为准, 其余各数可多取一位。例如,

$$10.2838+15.03+8.69547\rightarrow10.28+15.03+8.70\approx34.01$$

② 减法运算时, 当相减两数相差甚远时, 运算原则同加法运算; 当两数很接近时, 有可能造成很大的相对误差, 因此首先要尽量避免导致相近两数相减的测量方法。另外, 在运算中要多保留几位有效数字。

③ 乘除法运算时, 以有效数字位数最少的为准, 其余参与运算的数字及结果中的有效数字位数与之相等。例如,

$$517.43\times0.28/4.08\rightarrow5.2\times10\times0.28/4.1\approx36$$

为了保证必要的精确度, 参与乘除法运算的各数及最终运算结果也可以比有效数字位数最少的多保留一位有效数字。例如, 上面例子中的 517.43 和 4.08 也可保留至 517 和 4.08, 结果则为 35.5。

④ 乘方、开方运算时, 运算结果比原数多保留一位有效数字。例如,

$$27.8^2\approx772.8 \quad 115^2\approx1.322\times10^4 \quad \sqrt{9.4}\approx3.07 \quad \sqrt{265}\approx16.28$$

对有效数字中多余数字的舍入根据有效数字的舍入规则进行。

## 3. 有效数字的舍入规则

对有效数字的舍入, 舍入前后两个数值的差异称为舍入误差。对有效数字舍入时, 应尽量减小舍入误差的影响, 其规则如下:

① 删略部分最高位数字大于 5 时, 进 1。

② 删略部分最高位数字小于 5 时, 舍去。

③ 删略部分最高位数字等于 5 时, 5 后面只要有非零数字时进 1; 如果 5 后面全为零或无数字时, 则采用偶数法则, 即 5 前面为偶数时舍 5 不进, 5 前面为奇数时进 1。

所以用有效数字表示  $R=40.67\pm0.5\Omega$  时的结果应为  $R=41\Omega$ , 而不是  $R=40\Omega$ 。

在实际工作中, 经常遇到测量报告值和测量记录值的概念。测量报告值类似于有效数字, 要保证不能丢失真实值, 有效数字位数的取舍要保证有效数字末位  $\pm0.5$  个单位不小于绝对误差 (或不确定度); 而记录值主要用于备案, 它类似于用 “有效数字+安全数字” 表示测量结果的方法, 要求的位数多, 一般将记录值的末位与绝对误差对齐。测量报告值和测量记录值多余数字的舍入要根据有效数字的舍入规则进行。

**【例 1-3】**用一台 0.5 级电压表 100V 量程的电压表测量电压, 指示值为 85.35V, 试确定有效数字的位数。

**解:** 该表 100V 量程挡的最大绝对误差为:  $\Delta U_m=\pm0.5\%\times100\text{V}=\pm0.5\text{V}$

可见被测量实际值在 84.85~85.85V 之间, 因为绝对误差为  $\pm0.5\text{V}$ , 根据 “0.5 误差原则”, 测量结果的末位应为个位, 即应保留两位有效数字。因此不标注误差时的测量报告值为 85V。



若取其记录值, 因误差为  $0.5\text{V}$ , 所以其测量记录值为  $85.4\text{V}$ 。

### 1.4.3 测量数据的处理

为了获得比较准确的测量结果, 通常要对一个量的多次测量数据进行分析处理。其处理步骤如下:

- ① 列出测量数据  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。
- ② 求算术平均值 (测量值)  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。
- ③ 求剩余误差 (残差)  $v_i = x_i - \bar{x}$ 。
- ④ 用贝塞尔公式计算标准偏差估计值  $\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}$ 。
- ⑤ 利用莱特准则 ( $3\sigma$  准则) 判别是否存在粗差。如果  $|v_i| > 3\hat{\sigma}$ , 则该次测量值  $x_i$  为坏值, 剔除  $x_i$  后再按照上述步骤重新计算, 直到不存在坏值并且剔除坏值后的测量次数不少于 10 次为止, 如果不满 10 次应重新测量。
- ⑥ 判断有无系差。若有系差, 应查明原因, 修正或消除系差后重新测量。
- ⑦ 求算术平均值  $\bar{x}$  的标准偏差估计值  $\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \hat{\sigma} / \sqrt{n}$ 。
- ⑧ 给出测量结果的表达式, 即

$$A = \bar{x} \pm 3\hat{\sigma}_{\bar{x}}$$

式中,  $\bar{x}$  称为测量值;  $\pm 3\hat{\sigma}_{\bar{x}}$  称为不确定度。置信度即可信程度, 不确定度数值越大, 置信度越高, 丢失真实数据的可能性越小。



## 本章小结

本章讨论了电子测量的基本知识:

- (1) 简要介绍了电子测量的意义、内容、特点和分类, 以及电子测量仪器的分类和技术指标。
- (2) 测量误差的表示方法有绝对误差、相对误差和允许误差。满度相对误差是衡量电工仪表准确度的常用指标, 而允许误差用于描述电子测量仪器的测量准确度等级且是人为规定的某类仪器测量时产生的测量误差的极限值。
- (3) 测量误差按照性质分为系统误差、随机误差和粗大误差。系统误差越小, 测量准确度越高; 随机误差越小, 测量的精密度越高。随机误差和系统误差越小, 测量精确度 (或精度) 越高。准确度和精密度之间无必然的联系。
- (4) 测量误差产生的原因是多方面的。为了减小系统误差, 在测量之前应尽量发现并消除可能产生系统误差的来源及其影响, 在测量中应采用适当的方法或引入修正值加以抵消或削弱误差。为了减小随机误差, 可以采用多次测量求平均等方法加以消除或削弱。
- (5) 测量结果常用有效数字来表示, 应根据实际情况, 遵循有效数字位数取舍和有效数字舍入规则进行。
- (6) 为了测得准确的结果, 一般要进行多次测量, 多次测量的算术平均值即测量值。数据处理过程中得到的不确定度具有测量误差的含义, 是测量误差的极限值。不确定度越大, 置信度越高, 丢失真实数据的可能性越小。





## 习题 1

1. 在测量电压时，如果测量值为  $100\text{V}$ ，实际值为  $95\text{V}$ ，则测量绝对误差和修正值分别是多少？如果测量值是  $100\text{V}$ ，修正值是  $-10\text{V}$ ，则实际值和绝对误差分别是多少？
2. 用量程是  $50\text{mA}$  的电流表测量实际值为  $40\text{mA}$  的电流，如果读数值为  $38\text{mA}$ ，试求测量的绝对误差、实际相对误差、示值相对误差各是多少？
3. 如果要测量一个  $8\text{V}$  左右的电压，现有两块电压表，其中一块量程为  $10\text{V}$ 、1.5 级，另一块量程为  $20\text{V}$ 、1.0 级。问应选用哪一块表测量较为准确？
4. 已知用量程为  $100\text{mA}$  的标准电流表校准另一块电流表时，测量相同电流的电流值分别是  $90\text{mA}$ 、 $94.5\text{mA}$ ，求被校电流表的绝对误差、修正值、实际相对误差分别是多少？如果上述结果是最大误差的话，则被校表的准确度等级应定为几级？
5. 用一台 0.5 级  $10\text{V}$  量程电压表测量电压，指示值为  $7.526\text{V}$ ，试确定本次测量的记录值和报告值分别是多少？
6. 将下列数字进行舍入处理，要求保留三位有效数字。 $54.79$ 、 $86.3724$ 、 $500.028$ 、 $21000$ 、 $0.003125$ 、 $3.175$ 、 $43.52$ 、 $58350$ 。
7. 已知某电压为  $18.438 \pm 0.052\text{V}$ ，试将其改写成有效数字、有效数字加 1 位安全数字的结果表示形式。
8. 从下列数据  $2.100\text{k}\Omega$ 、 $2.10\text{k}\Omega$ 、 $2100\Omega$ 、 $2.1\text{k}\Omega$ 、 $2.100 \times 10^3\Omega$ 、 $0.2100 \times 10\text{k}\Omega$  中找出相同的数据。

# 第 2 章 测量用信号发生器



**学习参考：**信号发生器用于提供测量所需的各种信号，是应用很普遍的电子测量仪器。本章主要介绍信号发生器的组成原理与使用。要求通过学习，熟悉信号发生器的技术性能、了解其组成与工作原理、掌握其使用方法。

**本章要点：**信号发生器的性能指标与分类，各类信号发生器的工作原理及使用方法，合成信号发生器的频率合成技术，脉冲波形的表征。

## 2.1 概述

信号发生器即信号源，它负责提供测量所需的各种电信号，是最基本、应用最广泛的电子测量仪器之一。

### 2.1.1 信号发生器的分类

信号发生器用途广泛、种类繁多，它可分为通用信号发生器和专用信号发生器两大类。专用信号发生器是为某种特殊需求提供专用的测量信号，如调频立体声信号发生器、电视信号发生器等，灵活性好，可以依据以下几点进行分类。

#### 1. 按照输出信号波形分类

按照信号发生器输出信号波形的不同，信号发生器大致分为正弦信号发生器、函数信号发生器、脉冲信号发生器和随机信号发生器；应用最普遍的是正弦信号发生器。函数信号发生器也比较常用，这是因为它不仅可以输出多种波形，而且信号频率范围较宽；脉冲信号发生器主要用于测量数字电路的工作性能和模拟电路的瞬态响应；随机信号发生器即噪声信号发生器，用来产生实际电路与系统中的模拟噪声信号，借以测量电路的噪声特性。

#### 2. 按照频率范围分类

按照信号发生器输出信号频率范围的不同，信号发生器通常分为超低频、低频、视频、高频、甚高频、超高频信号发生器。如表 2-1 所示。

表 2-1 信号发生器的频率范围

类 型	频率范围
超低频信号发生器	0.0001Hz~1kHz
低频信号发生器	1Hz~1MHz
视频信号发生器	20Hz~10MHz
高频信号发生器	200kHz~30MHz
甚高频信号发生器	30~300MHz
超高频信号发生器	300MHz 以上



注意,随着科学技术的发展和应用场合的不同,信号发生器的频率范围会产生变化。

### 3. 按照性能指标分类

按照信号发生器性能指标的不同,信号发生器分为一般信号发生器和标准信号发生器。前者是指对输出信号的频率、幅度的准确度和稳定度,以及波形失真等指标要求均不高的一类信号发生器。后者是指输出信号的频率、幅度、调制系数等在一定范围内连续可调,并且读数准确、稳定、屏蔽良好的中、高档信号发生器。

按照调制方式的不同,信号发生器可分为调幅、调频、调相、脉冲调制等类型。

#### 2.1.2 信号发生器的主要性能指标

信号发生器的性能指标主要包括以下几项。

##### 1. 频率特性

频率特性指标主要包括频率范围、频率准确度和频率稳定度。

###### (1) 频率范围

频率范围即有效频率范围,是指其他指标均能得到保证的输出信号的频率范围。

###### (2) 频率准确度

频率准确度是指频率实际值 $f_0$ 与其标称值 $f_x$ 的相对偏差,实为输出信号频率的工作误差。设频率准确度为 $a$ ,则表达式为

$$a = \frac{f_0 - f_x}{f_x} = \frac{\Delta f}{f_0}$$

式中, $f_x$ 为输出信号的标称值,又称为预调值,是信号发生器频率调节装置上的频率指示值。

###### (3) 频率稳定度

频率稳定度用于表征信号发生器维持工作于恒定频率的能力。它是指其他外界条件恒定不变的情况下,在规定时间内,信号发生器输出频率相对于标称值变化的程度。频率稳定度分为长期稳定度和短期稳定度。长期稳定度是指信号发生器经规定的预热时间后,信号频率在任意 3h 内所发生的最大变化。频率短期稳定度是指经规定的预热时间后,在任意 15min 内所发生的频率的最大变化,表达式为

$$\delta = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_x}$$

式中, $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 是在任意 15min 内输出信号频率的最大值和最小值, $\delta$ 为短期频率稳定度。

##### 2. 输出特性

输出特性指标主要包括输出阻抗、输出电平及其平坦度、输出形式、输出波形和谐波失真等。

###### (1) 输出阻抗

输出阻抗视信号发生器类型而异。低频信号发生器电压输出端的输出阻抗一般为 600 $\Omega$ 或 1k $\Omega$ ,功率输出端依据输出匹配变压器的设计而定,通常有 50 $\Omega$ 、75 $\Omega$ 、150 $\Omega$ 、600 $\Omega$ 和 5k $\Omega$ 等不同输出阻抗。高频信号发生器一般只有 50 $\Omega$ 或 75 $\Omega$ 一种输出阻抗。当使用高频信号发生器时,应特别注意阻抗的匹配连接。



### (2) 输出电平及其平坦度

输出电平是指输出信号幅度的有效范围,即由产品标准规定的信号发生器的最大输出电压和最大输出功率,以及其在衰减范围内所得到的输出幅度的有效范围。输出信号的幅度可用电压有效值或绝对电平表示。绝对电平的具体内容参见 3.3.4 节。

输出电平平坦度一般是指在有效频率范围内调节频率时,输出电平随频率变化的程度。

### (3) 输出形式

输出形式包括如图 2.1 所示的平衡输出(即对称输出  $u_2$ )和不平衡输出(即不对称输出  $u_1$ )两种形式。

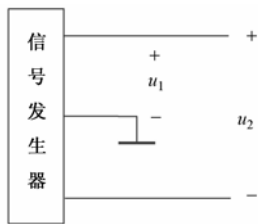


图 2.1 信号发生器的输出形式

### (4) 输出波形及谐波失真

输出波形是指信号发生器所能输出信号的波形。由于非线性失真、噪声等原因,正弦信号发生器的输出信号并不是单一频率的正弦信号,还含有谐波等其他成分,即信号的频谱不纯。

表征正弦信号频谱纯度的性能指标为谐波失真度。谐波失真度即非线性失真度,指的是信号中所有谐波能量之和与基波能量之比的百分数。表达式为

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}}{U_1} \times 100\%$$

式中,  $\gamma$  为谐波失真度,  $U_2$ 、 $U_3$ 、 $\cdots$ 、 $U_n$  为基波的二次、三次、 $\cdots$ 、 $n$  次谐波电压有效值,  $U_1$  为基波电压有效值。

## 3. 调制特性

高频信号发生器在输出正弦波的同时,一般还能输出调幅波和调频波,有的具有调相和脉冲调制等功能。例如 QF1481 型合成信号发生器同时具有调幅、调频、调相和脉冲调制特性。当调制信号由信号发生器内部产生时,称为内调制。当调制信号由外部电路或低频信号发生器提供时,称为外调制。高频信号发生器的调制特性包括调制方式、调制频率、调制系数以及调制线性等。

### 2.1.3 信号发生器的一般组成

图 2.2 为信号发生器的一般组成框图,包括主振器、变换器、输出级、指示器、电源等部分。主振器是信号发生器的核心部分,用于产生频率、波形不同的信号。变换器用于对主振信号进行放大、整形及调制等工作。输出级用于调节信号的输出电平和变换输出阻抗。指示器用于监测输出信号的电平、频率及调制度。电源为仪器各部分提供所需的工作电压。

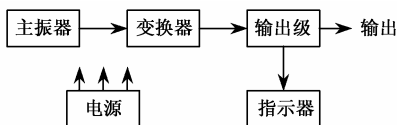


图 2.2 信号发生器的一般组成

## 2.2 正弦信号发生器

正弦信号发生器包括低频、高频、甚高频、超高频信号发生器等，低频、高频信号发生器的使用很广泛。

### 2.2.1 低频信号发生器

低频信号发生器又称为音频信号发生器，用于产生  $1\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$  的低频正弦信号、方波信号及其他波形信号。低频信号发生器是一种多功能、宽量程的电子仪器，在低频电路测试中应用比较广泛，还可以为高频信号发生器提供外部调制信号。

#### 1. 低频信号发生器的组成

图 2.3 为低频信号发生器组成框图，主要包括主振器、电压放大器、输出衰减器、功率放大器、阻抗变换器和指示电压表等。

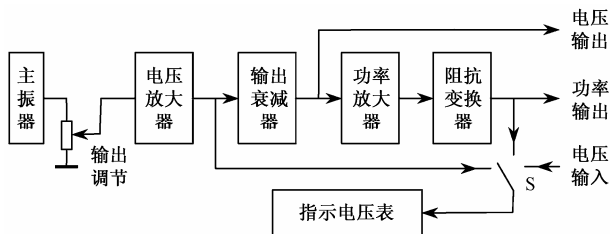


图 2.3 低频信号发生器的组成框图

##### (1) 主振器

主振器用于产生与输出信号频率一致的低频正弦信号。 $\text{RC}$  文氏桥式振荡器具有输出波形失真小、振幅稳定、频率调节方便和频率可调范围宽等特点，故被普遍应用于低频信号发生器中。

文氏桥式振荡器每个波段的频率覆盖系数（即最高频率与最低频率之比）为 10，因此，要覆盖  $1\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$  的频率范围，至少需要五个波段。为了在不分波段的情况下得到很宽的频率覆盖范围，有时采用图 2.4 所示的差频式低频振荡器。假设  $f_2=3.4\text{MHz}$ ， $f_1$  可调范围为  $3.3997\sim 5.1\text{MHz}$ ，则振荡器出差频信号的频率范围为  $300\text{Hz}$  ( $3.4-3.3997\text{MHz}$ )  $\sim 1.7\text{MHz}$  ( $5.1-3.4\text{MHz}$ )。

差频式振荡器的缺点是对两个振荡器的频率稳定性要求很高，两个振荡器应远离整流管、功率管等发热元件，彼此分开，并良好屏蔽。

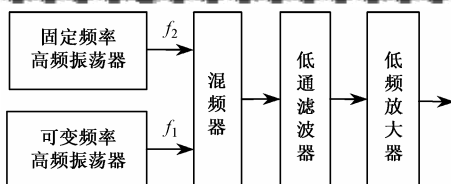


图 2.4 差频式低频振荡器组成框图

## (2) 电压放大器

电压放大器兼有缓冲和电压放大的作用。缓冲是为了避免前后级电路产生相互影响，一般采用射随器或运放组成的电压跟随器。放大是为了使信号发生器的输出电压达到预定性能指标。为了使主振输出调节电位器的阻值变化不影响电压放大倍数，要求电压放大器的输入阻抗较高。为了在调节输出衰减器时，不影响电压放大器，要求电压放大器的输出阻抗低，有一定的带负载能力。为了适应信号发生器宽频带等的要求，电压放大器应具有宽的频带、小的谐波失真和稳定的工作性能。

## (3) 输出衰减器

输出衰减器用于改变信号发生器的输出电压或功率，分为连续调节和步进调节。连续调节由电位器实现，步进调节由步进衰减器实现。图 2.5 为常用输出衰减器原理图，图中电位器 RP 为连续调节器（细调），电阻  $R_1 \sim R_8$  与开关 S 构成步进衰减器，开关 S 为步进调节器（粗调）。调节 RP 或变换开关 S 的挡位，均可使衰减器输出不同的电压。

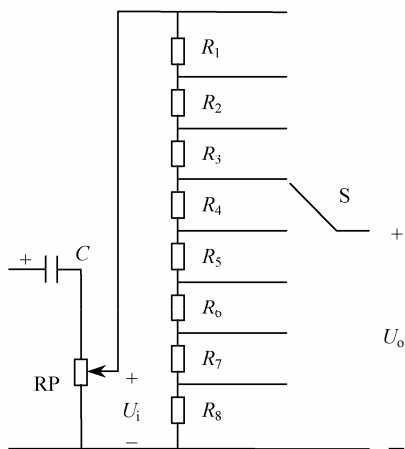


图 2.5 衰减器原理图

步进衰减量的表示方法有两种：一种是用其输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_i$  之比来表示，即  $U_o/U_i$ ；另一种是用  $U_o/U_i$  的分贝值来表示，即  $20\lg(U_o/U_i)$ ，单位为 dB（分贝）。

## (4) 功率放大器及阻抗变换器

功率放大器用来对衰减器输出的电压信号进行功率放大，使信号发生器达到额定功率输出。为了能与不同负载相匹配，功率放大器与其后的阻抗变换器相连接，这样可以得到失真小的波形和最大的功率输出。

阻抗变换器只有在要求功率输出时才使用，电压输出时只需衰减器。阻抗变换器即匹配输出变压器，它的输出阻抗是利用变换开关改变输出变压器次级圈数来实现的。输出频率为



5Hz~5kHz 时使用低频匹配变压器，以减少低频损耗，输出频率为 5kHz~1MHz 时使用高频匹配变压器。

## 2. 低频信号发生器的主要工作特性

低频信号发生器的主要工作特性如下：

- ① 频率范围 一般为 20Hz~1MHz，且连续可调。
- ② 频率准确度  $\pm(1\sim3)\%$ 。
- ③ 频率稳定度 一般为  $(0.1\sim0.4)\%/小时$ 。
- ④ 输出电压 0~10V 连续可调。
- ⑤ 输出功率 0.5~5W 连续可调。
- ⑥ 非线性失真范围  $(0.1\sim1)\%$ 。
- ⑦ 输出阻抗 50Ω、75Ω、150Ω、600Ω、5kΩ 等几种。
- ⑧ 输出形式 平衡输出与不平衡输出。

## 3. 低频信号发生器的使用

低频信号发生器型号很多，但它们的使用方法基本类似。

### （1）了解面板结构

使用仪器之前，应结合面板上的文字符号及技术说明书对各开关旋钮的功能及使用方法进行耐心细致的了解，切忌盲目猜测。信号发生器面板上有关部分通常按其功能分区布置，一般包括：波形选择开关、输出频率调节部分（包括波段、粗调、微调等）、幅度调节旋钮（包括粗调、细调）、阻抗变换开关、指示电压表及其量程选择、电源开关及电源指示、输出接线柱等。

### （2）注意正确的操作步骤

信号发生器的操作步骤如下：

- ① 准备工作 正确选择符合要求的电源电压，把幅度调节旋钮置于起始位置（最小）开机预热 2~3min 后方可投入使用。
- ② 选择频率 根据需要选择合适的波段，调节频率粗调和频率微调旋钮至合适的位置。
- ③ 输出阻抗的配接 根据负载阻抗的大小，拨动阻抗变换开关于相应挡级以获得最佳负载输出。否则，信号发生器的输出功率小、输出波形失真大。
- ④ 输出电路形式的选择 根据负载电路的输入方式，用短路片变换信号发生器输出接线柱的接法以选择相应的平衡输出或不平衡输出。
- ⑤ 输出电压的调节和测读 调节幅度调节旋钮可以得到相应大小的电压输出。在使用衰减器（除 0dB 挡外）时，如图 2.3 所示，电压表测量的是未经衰减器衰减的电压大小，所以输出电压的大小为电压表的示值除以电压衰减倍数。例如，信号发生器指示电压表示值为 20V，衰减分贝数为 60dB 时，实际输出电压应为 0.02V ( $20V \div 10^{60/20}$ )。当信号发生器不平衡输出时，电压表示值即为输出电压值；当信号发生器平衡输出时，输出电压为电压表示值的两倍。

## 4. 低频信号发生器实例

GAG-808G 型低频信号发生器主要由文氏桥式振荡器、波形变换开关、方波成形电路、输出放大器、输出电路、输出衰减器等部分组成，如图 2.6 所示。

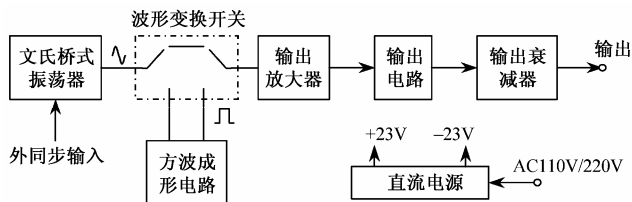


图 2.6 GAG-808G 型低频信号发生器组成框图

- ① 文氏桥式振荡器用于产生频率范围为  $10\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$  的振荡信号。
- ② 方波成形电路为施密特触发器，用于将正弦波变换为方波。文氏桥式振荡器和方波成形电路中都含缓冲放大器，用于隔离后级电路对本级电路的影响。施密特触发器又称为射极耦合双稳态电路，它可以将非矩形波或不规则的矩形波转换成为矩形波，常用于整形或电压幅度鉴别。
- ③ 输出放大器对前级电路的输出进行放大，并实现对输出电平的调整。
- ④ 输出电路用于变换阻抗。
- ⑤ 输出衰减器即步进衰减器，用于调整输出信号幅值的大小，衰减器分  $0 \sim -50\text{dB}$  共六挡，每挡相差  $10\text{dB}$ 。当衰减为  $0\text{dB}$  时，最大输出电压超过  $7\text{V}$ ，输出阻抗为  $600\Omega$ 。
- ⑥ 电源为各部分电路提供  $\pm 23\text{V}$  直流电源。

图 2.7 所示为 GAG-808G 型低频信号发生器前面板结构图。各开关旋钮的名称与作用如下。

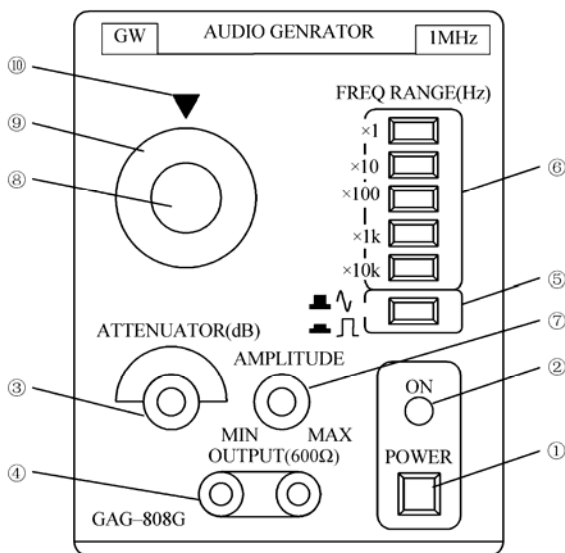


图 2.7 GAG-808G 型低频信号发生器前面板结构图

- ① 电源开关 电源总开关，按下时，打开电源。
- ② 电源指示灯 打开电源时，电源指示灯亮。
- ③ 输出衰减调节旋钮（输出粗调） 调节该旋钮可以对输出信号幅度进行衰减。
- ④ 信号输出端 输出接线柱，输出阻抗为  $600\Omega$ 。





- ⑤ 波形变换开关 按下时输出方波，弹出时输出正弦波。
- ⑥ 频率倍乘按钮 用于波段变换，共有 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1k$ 、 $\times 10k$ 五挡，与频率刻度盘上的乘积等于输出信号的频率。
- ⑦ 幅度调节旋钮（输出细调） 顺时针调节输出信号增大；反之，减小。
- ⑧ 频率度盘调节旋钮 调节该旋钮带动频率度盘标尺移动，输出信号的频率。
- ⑨ 频率度盘标尺 标尺上标有 10~100 个频率刻度。
- ⑩ 频率度盘指针 指示频率度盘所选数值。

此外，信号发生器后面板还有外同步信号输入端（EXT SYNC）。当输入小于 3V 的外同步信号时，强迫信号发生器的输出频率与外同步信号同步。外同步信号每增大 1V 可使信号发生器产生 $\pm 1\% f_0$ 的频率变化。例如，输出频率为 1kHz，同步电压为 1V 时，实际输出频率范围为 990~1010Hz。

GAG-808G 型低频信号发生器的使用方法及其性能指标参见技术说明书。

## 2.2.2 高频信号发生器

高频信号发生器和甚高频信号发生器在高频电路测试中应用比较广泛，二者统称为高频信号发生器。高频信号发生器通常产生 200kHz~30MHz 的正弦波或调幅波信号，如无特别说明，均特指此种高频信号发生器。甚高频信号发生器用来产生 30~300MHz 的正弦波、调幅波或调频波信号。

### 1. 高频信号发生器的组成

高频信号发生器的组成框图如图 2.8 所示，主要包括主振器、缓冲级、调制级、输出级、衰减器、内调制振荡器等。

#### （1）主振器

主振器是信号发生器的核心，用于产生高频振荡信号。主振级一般采用可调频率范围宽、频率准确度高、稳定性好的 LC 振荡器。为了使信号发生器有较宽的频率范围，可以在主振器之后加入倍频器、分频器或混频器。主振器电路结构简单，输出功率一般为几瓦到几十毫瓦。

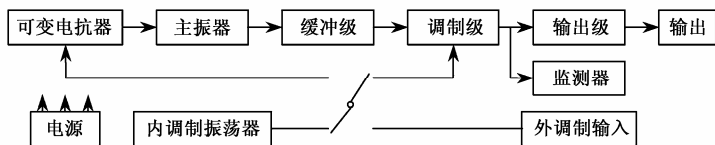


图 2.8 高频信号发生器组成框图

#### （2）缓冲级

缓冲级起到阻抗变换的作用，用于隔离调制级对主振器产生的不良影响，以保证主振器稳定工作。否则，由于调制级输入阻抗不高且在调幅过程中不断变化，而使主振级振荡频率不稳定并产生寄生调频。

#### （3）调制级

调制级实现调制信号对载波的调制，它包括调频和调幅等调制方式。在输出载波或调频



波时, 图 2.8 中的调制级实际上是一个宽带放大器; 在输出调幅波时, 实现振幅调制和信号放大。

#### (4) 可变电抗器

可变电抗器与主振器的谐振回路相耦合, 在调制信号作用下, 控制谐振回路电抗的变化实现调频。

#### (5) 内调制振荡器

内调制振荡器用于为调制级提供频率为 400Hz 或 1kHz 的内调制正弦信号, 该方式称为内调制。当调制信号由外部电路提供时, 称为外调制。

#### (6) 输出级

输出级主要由放大器、滤波器、输出微调器、输出倍乘器等组成, 对高频输出信号进行调节以得到所需的输出电平, 最小输出电压可达  $\mu\text{V}$  数量级。输出级还用来提供合适的输出阻抗。

#### (7) 监测器

监测器用以监测输出信号的载波幅度和调制系数。

#### (8) 电源

电源用来供给各部分所需要的电压和电流。

## 2. 高频信号发生器实例

XFG-7 型高频信号发生器是一个具有标准频率与标准输出电压的高频信号发生器。它既能产生等幅波, 又能产生调幅波, 可以方便地应用于高频放大器、调制器以及滤波器性能指标的测量, 特别适用于无线电接收机性能指标的测试。

#### (1) 整机组成

XFG-7 型高频信号发生器组成框图如图 2.9 所示。

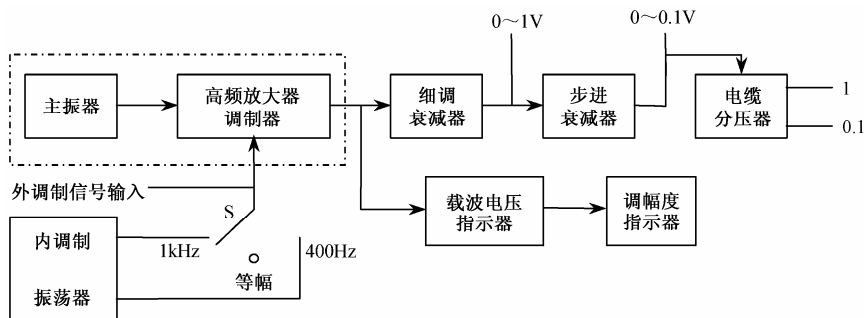


图 2.9 XFG-7 型高频信号发生器组成框图

① 主振器是一个 LC 振荡器, 它通过变换振荡回路中的电感  $L$  改变频段、调节电容  $C$  来连续改变频率。

② 高频放大器具有放大、调幅作用。

③ 细调衰减器用于连续调节输出幅度, 调节范围在 0~1V。

④ 步进衰减器用于对输出信号作进一步衰减, 其输出电压最大仅为 0.1V。

⑤ 为了获得更小的输出电压, 信号发生器还配有一根内藏分压器的输出电缆, 分压比为 1:1 和 1:10, 在这根电缆插口上分别标有“1”和“0.1”字样, 由此可选择附加分压比。

⑥ 内调制振荡器是一个 LC 振荡器, 产生供调幅用的 400Hz 或 1kHz 低频正弦信号。当



高频信号幅度一定时,调幅度的大小由调制信号电压决定。调幅度指示器通过测量低频信号的振幅来指示调幅波的调幅度。

## (2) 使用方法

图 2.10 所示为 XFG-7 型高频信号发生器面板结构图,其使用方法如下:

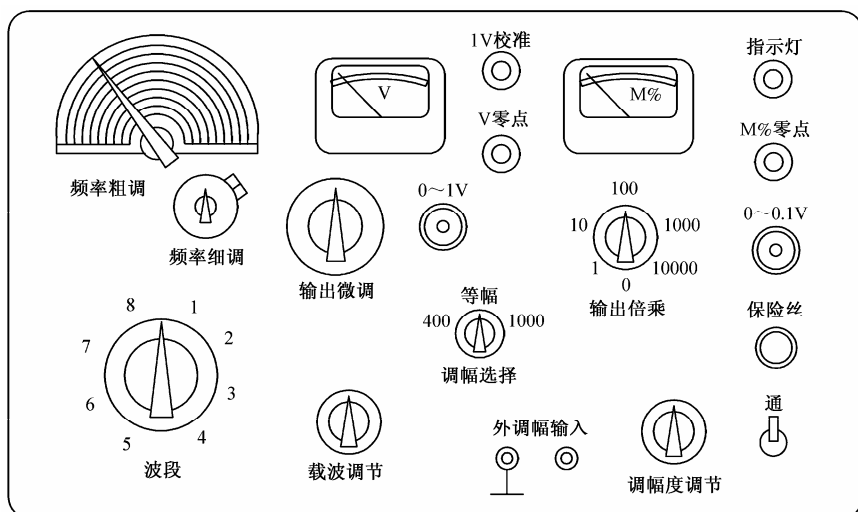


图 2.10 XFG-7 型高频信号发生器面板图

① 准备工作 通电前将“载波调节”、“调幅度调节”和“输出微调”旋钮逆时针旋转到最小位置,将“输出倍乘开关”置于 1。

② 调零 通电前对指示电表进行机械调零。通电后,将“波段开关”置于任意两挡之间,使主振器停振,调节“V 零点”旋钮使 V 表指针处于零点。接着将“波段开关”调至任意挡使振荡器振荡,调节“载波调节”旋钮,使 V 表指针指在红线“1”上,调节“M%零点”旋钮使 M%表指针指在零点。

③ 调节频率 将“波段”开关置于所需波段位置,调节“频率粗调”和“细调旋钮”得到准确频率。

④ 调节电压 调节“载波调节”旋钮使 V 表指针指在红线“1”上,根据所需电压选择输出插孔。

- 输出电压在 0.1V 以上时选择 0~1V 插孔。输出电压由“输出微调”旋钮刻度盘读出,其读盘最大读数为 1V。调节“输出微调”旋钮至所需的输出电压值。
- 输出电压在 0.1V 以下时选择 0~0.1V 插孔,这时输出电压等于“输出微调”读数与“输出倍乘”开关读数的乘积,单位为  $\mu\text{V}$ 。
- 如果要求输出低阻抗的微弱信号,可在 0~0.1V 插孔上加接带有分压器的电缆,并在“0.1”插口处引出信号,输出电压为上述读数方法所得结果的 1/10。

⑤ 高频等幅信号输出 将“调幅选择”开关置于等幅位置。

⑥ 调幅波输出 根据调制信号来源分为内调幅和外调幅。

- 内调幅时,将“调幅选择”开关置于 400Hz 或 1kHz 位置,在 V 表指示为 1 情况下,调节“调幅度调节”旋钮使 M%表指针指在所需位置上。最常用的标准调幅度为 30%。
- 外调幅时,将“调幅选择”开关置于等幅位置,在外调幅输入接线柱上接入频率在



50Hz~8kHz 范围的低频正弦信号作为外调制信号，其他操作与内调幅相同。

#### ⑦ 使用注意事项

- 使用 0~0.1V 插孔时，应把 0~1V 插孔盖住，反之亦然。
- 使用内调幅时，不能在接线柱上加外调制信号。

使用高频信号发生器还应注意如下两点：

- 高频信号发生器的典型应用是用来测试接收机的性能。为了使接收机符合实际工作情况，必须在接收机与仪器间接一个等效的天线。等效天线接在电缆分压器的分压接线柱与接收机的天线接线柱之间。
- 信号发生器只有在阻抗匹配情况下才能正常工作。否则，除产生衰减系数误差外，还影响前级电路的工作，降低信号发生器的功率，在输出电路中出现驻波。因此，在失配连接时，应在信号发生器的输出端与负载间加一个阻抗变换器。

### 2.2.3 合成信号发生器

合成信号发生器是用频率合成器代替主振器的正弦信号发生器。频率合成器是以一个或几个标准频率为基准，利用锁相环（PLL，Phase Locked Loop）等进行频率合成的振荡器，频率合成器产生的信号具有很高的频率稳定性和极纯的频谱。

#### 1. 工作原理

除振荡器外，合成信号发生器的其他部分与高频信号发生器相似。图 2.11 所示为 QF1050 型信号发生器原理框图，它由射频部分、锁相部分、调制部分和控制部分等组成。

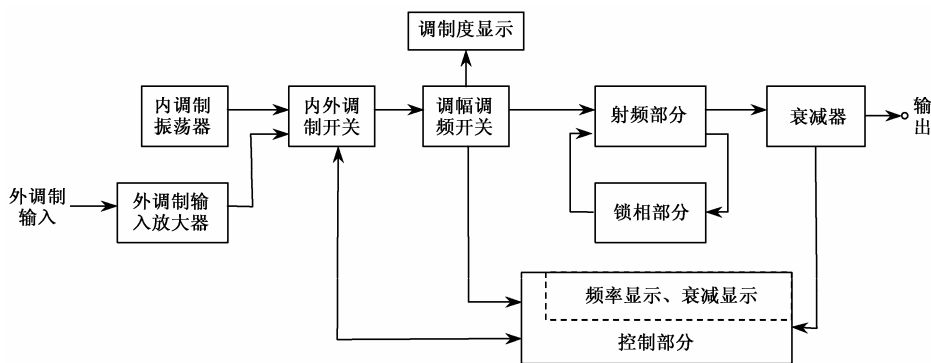


图 2.11 QF1050 型信号发生器原理方框图

##### (1) 射频部分

射频部分主要由压控振荡器、调制器、放大器、晶体振荡器和混频器等组成。压控振荡器可直接输出 75~110MHz 的频率信号，也可与 80MHz 晶体振荡信号混频后，得到 0.3~30MHz 的差频信号输出。输出信号经缓冲、放大，以及调制信号经电容分压后加到压控振荡器中的变容二极管上实现调频。调幅时，调制信号经放大后加到调制器中 PIN（Positive Intrinsic Negative）二极管上实现调幅。

##### (2) 锁相部分

锁相部分由可变倍频器、鉴相器、滤波器和压控振荡器（在射频部分内）等组成。来自



射频部分的输出信号经倍频、鉴相、滤波后,反馈到压控振荡器中的变容二极管达到锁相的目的。

### (3) 调制部分

调制部分由内调制振荡器、内外调制开关、调幅调频开关、调制度显示和外调制输入放大器等组成。内调制振荡器产生 400Hz 或 1kHz 的低频正弦信号,经内外调制开关、调幅调频开关加到射频部分,实现调幅或调频。调制度显示器通过测量调制信号的振幅显示调制度的大小。

### (4) 控制部分

控制部分包括频率控制器、输出电平の置定及其码组变换电路、存储器及其外围电路、显示电路。该部分主要用于实现输出频率与电平の置定,调制状态的选择、数据的存储与调用等。

## 2. 主要性能指标

QF1050 型信号发生器是采用锁相技术制成的标准信号发生器。它可提供载频、调频、调幅信号,并可接受立体声调制,主要用于调频、调幅接收机以及移动通信设备等的检验和维修。其主要性能指标如下:

### (1) 载频

- ① 频率范围 0.3~30MHz 和 75~110MHz 两个频段。
- ② 频率显示位数 6 位。
- ③ 显示分辨率 0.3~30MHz 和 75~110MHz 两个频段的分辨率分别为 100Hz、1kHz。
- ④ 频率稳定度 短期,经 30min 预热后,为  $5 \times 10^{-6}/15\text{min} + 30\text{Hz}$ ; 长期:  $50 \times 10^{-6}/3\text{h} + 30\text{Hz}$ 。

### (2) 调频、调幅

- ① 外调制频率范围 调频, 20Hz~100kHz; 调幅, 20Hz~10kHz。
- ② 内调制频率 400Hz、1kHz。
- ③ 频偏范围 0~99kHz, 两位数字显示。
- ④ 调幅系数 0~80%, 两位数字显示。

### (3) 输出电平

- ① 有效输出电平 -19~99dB (终端开路), 1dB 步进 (0dB=1μV)。
- ② 输出电平总误差 输出电平  $\geq 0\text{dB}$  时, 为  $\pm 2.5\text{dB}$ ; 输出电平  $< 0\text{dB}$  时, 为  $\pm 3\text{dB}$ 。
- ③ 输出阻抗 50Ω。

### (4) 预置功能

- ① 载频 (F)、输出电平 (L) 和调制功能 (M) 三者组合存储与调用 (32 组数据)。
- ② 输出电平单独预置, 输出电平 (L) 可独立存储与调用 (4 组数据), 此时, F-L-M 组合预置的数据减少到 28 组。

## 3. 面板结构

QF1050 型信号发生器面板结构如图 2.12 所示, 其使用方法参见产品说明书。

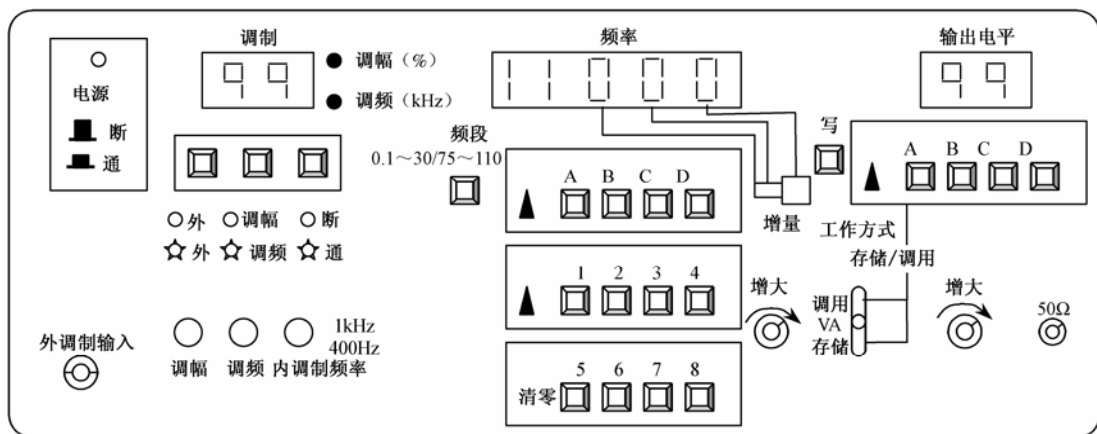


图 2.12 QF1050 型信号发生器面板图

## 2.3 函数信号发生器

函数信号发生器是一种能够产生正弦波、方波、三角波等函数波形的仪器，其频率范围约几毫赫至几十兆赫。现代函数信号发生器一般具有调频、调幅等调制功能和外部电压控制频率（VCF，Voltage Control the Frequency）特性，被广泛应用于生产测试、仪器维修等工作中。

### 2.3.1 工作原理及结构

函数信号发生器产生信号的方法有三种：第一种是由施密特电路产生方波，然后经变换得到三角波和正弦波形；第二种是先产生正弦波再得到方波和三角波；第三种是先产生三角波再变换为方波和正弦波。在此主要介绍第一种方法，即脉冲式函数信号发生器。

#### 1. 脉冲式函数信号发生器

脉冲式函数信号发生器的组成框图如图 2.13 (a) 所示，包括双稳态触发器、积分器和正弦波变换电路等部分。双稳态触发器通常采用施密特触发器，积分器则采用密勒积分器。密勒积分器即反相型负反馈积分器，因具有良好的线性而得到了广泛应用。

脉冲式函数信号发生器的工作过程如图 2.13 (b) 所示。假设开关  $S_1$  悬空，当双稳态触发器输出  $u_1=U_1$  为高电平时，积分器输出  $u_2$  将开始线性下降。当  $u_2$  下降到等于参考电平  $-U_r$  时，比较器使双稳态触发器翻转，由  $u_1$  变为  $-U_1$ ，同时， $u_2$  将开始以与下降相等的速率线性上升。当  $u_2$  上升到等于参考电平  $U_r$  时，双稳态触发器又翻转回去，完成一个循环周期。不断重复上述过程，即得到方波  $u_1$ 、三角波  $u_2$ ，以及由  $u_2$  经过正弦波成形电路变换成的正弦波。三种波形再经过输出级放大即可在输出端得到所需的波形。图 2.13 中 A、B 点波形极性相反。

如果  $S_1$  与  $VD_1$  相接，当触发器输出为  $U_1$  时， $VD_1$  导通，电阻  $R_3$  被短路，积分器很快下降，当下降到  $-U_r$  时，触发电路翻转，触发器输出为  $-U_1$ ， $VD_1$  截止， $R_3$  接入电路，积分器输出缓慢上升，形成正向锯齿波  $u_2(t)$ ，触发器输出为矩形波  $u_1(t)$ ，如图 2.13 (c) 所示。如果  $S_1$  与  $VD_2$  相接，将得到反向锯齿波和极性相反的矩形波。如果再用电位器代替  $R_3$ ，调整该电位器可以改变矩形波的占空比。占空比等于脉宽与周期之比。

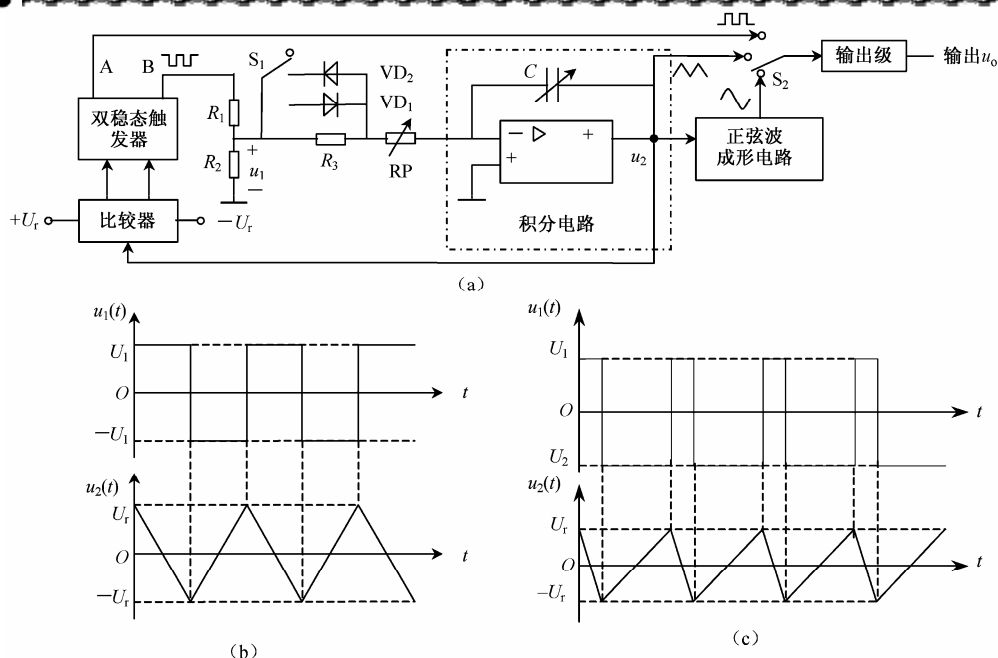


图 2.13 脉冲式函数信号发生器组成框图

如果将图 2.13 (b) 所示的两个波形叠加可以得到如图 2.14 (a) 所示的交错锯齿波  $u'_2(t)$ ，再进行全波整流，即可得到图 2.14 (b) 所示的锯齿波  $u_2(t)$ 。

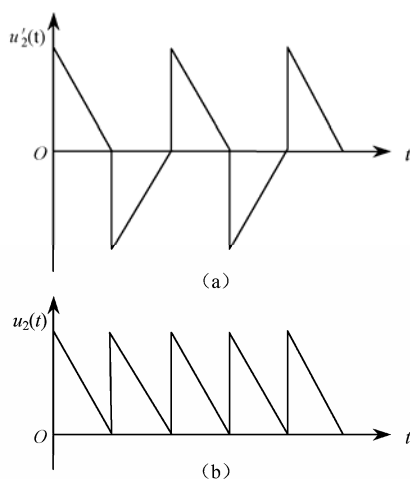


图 2.14 锯齿波的取得方法之一

由上述分析得出：脉冲式函数信号发生器无独立的主振器，而是由双稳态触发器、积分器和比较器构成的闭合回路组成的自激振荡器，它产生的最基本波形是方波和三角波。调换积分电容或改变电位器 RP 可以改变输出信号的频率。因为该函数信号发生器产生的各种波形不是采用 RC 或 LC 振荡器的原理，而是采用电压控制振荡频率的原理，因此可以采用外加电压控制来获得所需要频率的各种波形。



## 2. 正弦波成形电路

正弦波成形电路一般采用分段折线逼近的方法将三角波变换成为正弦波。图 2.15 (a)，图 2.15 (b) 和图 2.15 (c) 分别为该电路输出特性、输入波形、输出波形，由于该电路对信号的衰减随三角波幅度的加大而增加，而使输出波形向正弦波逼近。如果折线段选择足够多，并适当选择转折点的位置，即可得到很逼真的正弦波。

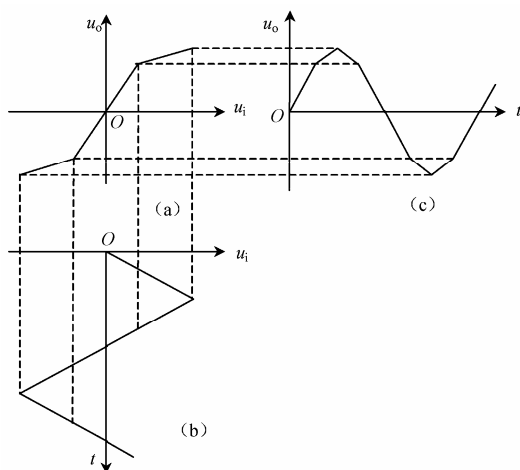


图 2.15 正弦波成形电路原理

图 2.16 为实际正弦波成形电路。正、负直流电源和电阻  $R_1 \sim R_7$  及  $R'_1 \sim R'_7$  为二极管提供适当的偏压，以控制三角波逼近正弦波时转折点的位置。随着输入电压的变化，6 对二极管依次导通和截止，把电阻  $R_8 \sim R_{13}$  依次接入电路或与电路断开，从而改变电路的输入/输出比例，每导通 1 个二极管就可得到 2 段折线。正半周时，由于  $VD_1$ 、 $VD_3$ 、 $VD_5$ 、 $VD_7$ 、 $VD_9$ 、 $VD_{11}$  的依次导通可以得到 12 段折线；负半周时，由于  $VD_2$ 、 $VD_4$ 、 $VD_6$ 、 $VD_8$ 、 $VD_{10}$ 、 $VD_{12}$  的依次导通也得到 12 段折线；另有 2 段是二极管都截止时得到的。故可以产生由 26 段折线逼近而成的正弦波，其波形失真小于 0.25%。

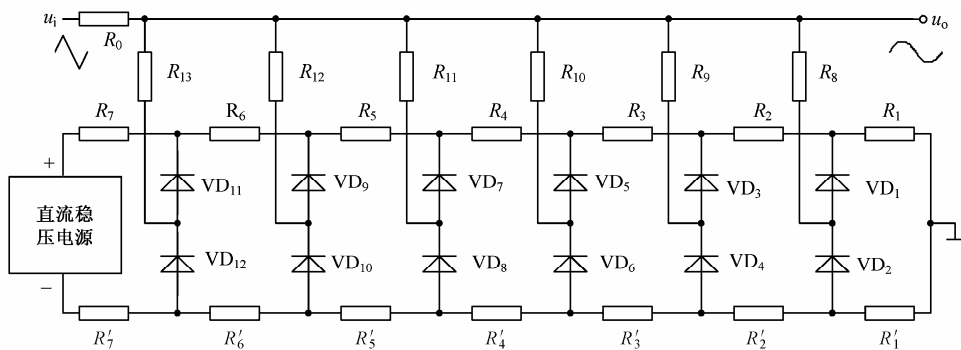


图 2.16 正弦波成形电路实例

### 2.3.2 AS101D型函数信号发生器简介

AS101D 型函数信号发生器是由集成电路和晶体管构成的通用函数信号发生器，能产生 0.2Hz~2MHz 的正弦波、方波、三角波、锯齿波和脉冲信号，并且有检测电路用 TTL、CMOS





逻辑电平输出, 另外还有 VCF 输入和  $\pm 10\text{V}$  直流偏置电压输出, 以及占空比调节等功能。AS101D 型函数信号发生器具有功能丰富、性能稳定、结构新颖、价格便宜、操作简便等特点。

## 1. 技术指标

- ① 频率范围  $0.2\text{Hz}\sim 2\text{MHz}$ , 分 7 个挡级。
- ② 输出波形 正弦波、三角波、方波、锯齿波和脉冲。
- ③ 输出电压 大于  $20\text{V}_{\text{P-P}}$  (负载开路)。即负载开路时, 输出电压的峰-峰值为  $20\text{V}$ 。有关峰-峰值的内容参见 3.1.2 节。
- ④ 输出波形直流偏置调节范围  $-10\sim +10\text{V}$  (负载开路)。
- ⑤ 占空比 脉冲占空比连续可调, 其变化范围为  $10\%\sim 90\%$ 。
- ⑥ 压空振荡 (VCF) 外加直流电压在  $0\sim 10\text{V}$  变化时, 对应频率变化小于  $100:1$ 。
- ⑦ 逻辑电平输出 TTL 电平: 大于  $3\text{V}$  (负载开路), 上升沿小于  $25\text{ns}$ , CMOS 电平:  $5\sim 14\text{V}$  连续可调。

## 2. 使用方法说明

AS101D 型函数信号发生器前面板结构如图 2.17 所示。

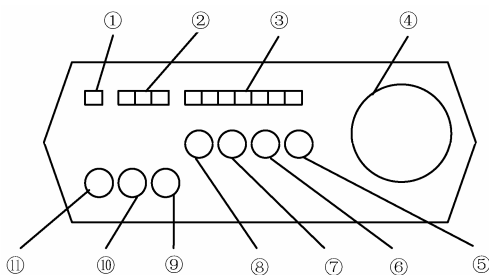


图 2.17 AS101D 型函数信号发生器前面板

### (1) 前面板按键旋钮的说明

- ① 电源开关键 (POWER) 按下电源开关键, 电源指示灯亮。
- ② 波形选择键 按下所需“波形选择”开关可以得到所需的输出波形。
- ③ 频率倍乘键 (FREQ MULT) 选择合适的“频率倍乘”按钮按下, 与“频率度盘”结合起来使用, 即可得到所需信号频率。二者的乘积等于输出信号频率。
- ④ 频率度盘 与频率倍乘键组合起来调节输出信号频率。
- ⑤ 输出幅度调节 (AMPL/-20dB) 顺时针方向调节该开关旋钮时, 增大输出信号幅度, 反之减小。当拉出 (PULL) 时, 输出衰减  $20\text{dB}$ 。
- ⑥ 逻辑电平旋钮 (TTL/CMOS) 当按下 (PUSH) 该开关旋钮时, 输出为 TTL 信号; 当拉出 (PULL) 时, 输出为 CMOS 信号, 调节该旋钮可以改变 CMOS 输出信号的大小。
- ⑦ 直流偏置旋钮 (OFFSET/ADJ) 当拉出 (PULL) 该开关旋钮时, 可用来调节输出信号的直流偏置电压, 该直流电压可在  $\pm 10\text{V}$  范围内变化。当被按下 (PUSH) 时, 输出信号中无直流偏置。
- ⑧ 占空比 (DUTY/INV) 输出波形形状由占空比控制, 若输出方波, 调节“占空比”



按钮可以将波形变为矩形波,若输出三角波,调节“占空比”按钮可以将波形变为锯齿波,若输出为正弦波,调节“占空比”按钮可改变波形的上升时间或下降时间。

- ⑨ 输出端(OUTPUT) 输出信号由此输出,输出阻抗为  $50\Omega$ 。
- ⑩ 逻辑电平输出端(OUTPUT TTL/CMOS) 逻辑电平输出端有单独的 BMC 输出插座。
- ⑪ 压控振荡输入(INPUT VCF) VCF 输入用于提供外部频率扫描信号,实现频率控制。当输入电压在  $0\sim 10\text{V}$  内变化时,输出信号的频率可以降低  $1\sim 100$  倍。

## (2) 使用方法简介

- ① 本仪器要求的电源为  $220\text{V}$ 、 $50\text{Hz}$ ,检查所用电源是否与仪器要求相符。接通电源,预热  $15\text{min}$  后投入使用。
- ② 按下相应的“波形选择”键可以得到所需波形。
- ③ 选择合适的“频率倍乘”开关,适当调节“频率刻度盘”得到所需信号频率。
- ④ 调节“幅度调节”旋钮来改变信号输出幅度的大小。
- ⑤ 调节“直流偏置”旋钮可改变输出波形的直流偏置,该功能对需要直流偏置检验的场合是很理想的。
- ⑥ 调节“占空比”旋钮,当“占空比”调节旋钮置于校准位置时,输出波形为标准方波、三角波或正弦波,当被置于非校准位置时,脉冲的占空比、锯齿波(三角波)的上升沿(或下降沿)可连续变化,其变化范围大于  $(10\sim 90)\%$ 。
- ⑦ 逻辑电平输出从单独的 BNC 插座输出,当“逻辑电平”按下时为 TTL 电平输出,拉出时为 CMOS 电平输出,且可调。
- ⑧ 当输出信号频率需要受控时,可从“VCF”端输入一个直流控制信号。当控制信号幅值变化时,输出信号的频率也随之发生变化,输入电压越高,输出信号的频率越低。

## 2.4 脉冲信号发生器

脉冲信号发生器用于产生频率、脉宽和幅度可调的脉冲信号,被普遍应用于电子测量系统以及数字通信、自动控制等领域,用来对视频放大器、宽带电路的振幅特性、过渡特性,以及逻辑器件的开关速度等进行测试。

脉冲信号发生器一般以矩形脉冲为标准信号输出,矩形脉冲主要有单脉冲和双脉冲两种。图 2.18 (a) 和图 2.18 (b) 为矩形单脉冲的实际波形和矩形双脉冲波形。

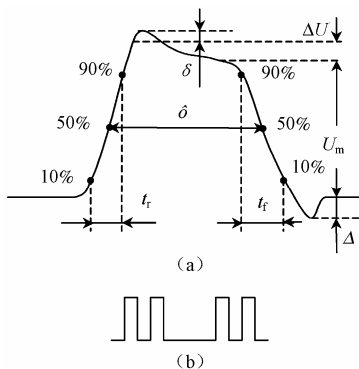


图 2.18 矩形单脉冲实际波形与双脉冲



矩形单脉冲的表征量除了周期、频率外，还包括：

- ① 脉冲幅度  $U_m$  是指从脉冲底部到顶部之间的电压值。
- ② 脉冲上升时间  $t_r$  又称为脉冲前沿，是指脉冲从  $0.1U_m$  上升到  $0.9U_m$  所用的时间。
- ③ 脉冲下降时间  $t_f$  又称为脉冲后沿，是指脉冲波从  $0.9U_m$  下降到  $0.1U_m$  所用的时间。
- ④ 脉冲宽度  $\delta$  即脉冲持续时间，是指脉冲前、后沿分别等于  $0.5U_m$  时相应的时间间隔。
- ⑤ 平顶降落  $\Delta U$  是指脉冲顶部不能保持平直而呈现倾斜降落的电压值。
- ⑥ 上冲量  $\delta$  是指上升沿超过幅度  $U_m$  以上所呈现的突出部分，通常以百分数形式表示。
- ⑦ 反冲量  $\Delta$  又称为下冲量，是指下降沿超过底值以下所呈现的向下突出部分，通常以百分数形式表示。

### 2.4.1 分类

按照用途和产生脉冲方式的不同，脉冲信号发生器分为通用脉冲信号发生器、快沿脉冲信号发生器、数字可编程脉冲信号发生器和特种脉冲信号发生器等。

#### (1) 通用脉冲信号发生器

通用脉冲信号发生器是最常用的脉冲信号发生器，其输出脉冲信号的频率、幅度、延迟时间等可在一定范围内连续可调，输出脉冲一般都有正、负两种极性。有些产品还具有前、后沿可调、双脉冲、群脉冲、闸门、外触发，以及单次触发等功能。

#### (2) 快沿脉冲信号发生器

快沿脉冲信号发生器以快速前沿为特征，主要用于各类电路瞬态特性测试，例如，测试示波器的瞬态响应等。

#### (3) 数字可编程脉冲信号发生器

数字可编程脉冲信号发生器是伴随集成电路技术、微处理器技术的发展而产生的新型脉冲信号发生器，它一般带有 GPIB (General Purpose Interface Bus) 接口，并可实现可编程控制功能。

#### (4) 特种脉冲信号发生器

特种脉冲信号发生器是指具有特殊用途、对某些性能指标有特定要求的脉冲信号发生器，如功率脉冲信号发生器和数字序列发生器等。

本书主要以 XC-15 型脉冲信号发生器为例介绍脉冲信号发生器。

### 2.4.2 工作原理与主要性能指标

#### 1. 工作原理

XC-15 型脉冲信号发生器为基本的通用脉冲信号发生器，它可以输出频率、脉宽可调的正、负极性脉冲，组成如图 2.19 所示。脉冲信号发生器的输出信号称为主脉冲。

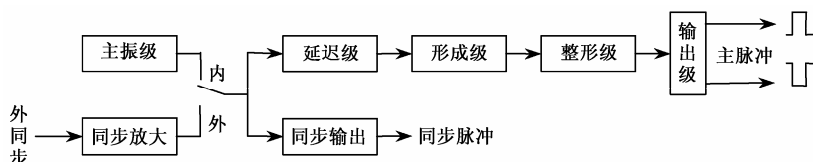


图 2.19 通用脉冲信号发生器组成框图

(1) 主振级

主振级用于产生频率可调的同步脉冲。同步脉冲作为延迟级的触发信号，要求波形的一致性要好，并具有足够的幅度。同步脉冲可由自激多谐振荡器、晶体振荡器或锁相振荡器产生，也可将正弦振荡信号进行放大、限幅，或者由外部信号经同步放大电路的放大整形后取得。

(2) 延迟级

延迟级用于产生与同步脉冲有一定延迟量的主脉冲，如图 2.20 所示， $t_d$  为延迟时间。延迟级通常由单稳电路和微分电路组成。对延迟级的要求是能在全波段内获得一定的延时量，并满足触发下一级电路所需的输出幅度。

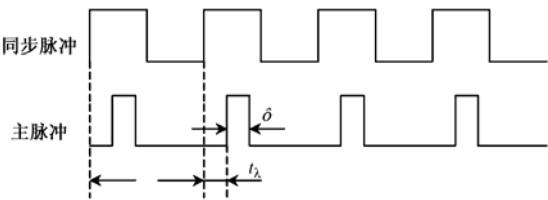


图 2.20 同步脉冲与主脉冲

(3) 形成级

形成级通常由单稳态触发器等电路组成，是脉冲信号发生器的中心环节。用于产生宽度准确、波形良好的矩形脉冲。形成级要求脉冲的宽度可独立调节，并具有较高的稳定性。

(4) 整形级与输出级

整形级一般由放大、限幅电路组成，具有限幅和电流放大作用。输出级主要包括脉冲放大器、倒相等，负责对输出信号进行功率放大及幅度、极性的调整。

2. 主要性能指标

脉冲信号发生器的性能指标主要包括频率范围、延迟时间、脉冲宽度等，表 2-2 为 XC-15、XC-19A 型通用脉冲信号发生器的主要性能指标。

表 2-2 两种脉冲信号发生器的主要性能指标

性能指标	XC-15 型脉冲信号发生器	XC-19A 型脉冲信号发生器
频率范围	1kHz~100MHz	300Hz~30MHz
延迟时间	5ns~300μs	15ns~1000μs
脉冲宽度	5ns~300μs	15ns~1000μs
上升时间、下降时间	≤2ns	5ns~300μs
输出幅度	150mV~5V	200mV~5V
输出波形	正、负脉冲，正、负倒置脉冲	
直流偏置	-1~+1V 连续可调	
外触发	有	
单次触发	手动	

2.4.3 脉冲信号发生器的使用

1. XC-15 型脉冲信号发生器的使用方法

图 2.21 为 XC-15 型脉冲信号发生器前面板结构图，使用方法如下：

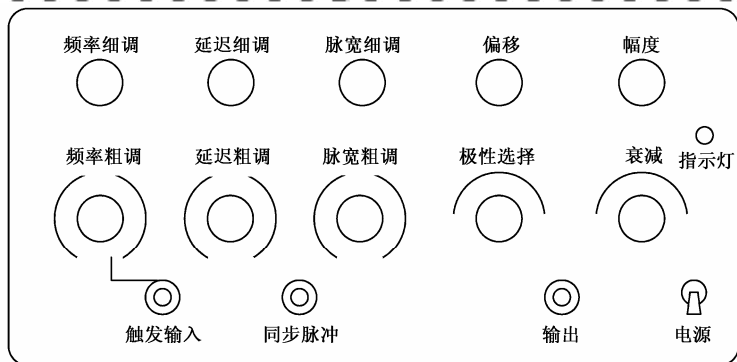


图 2.21 XC-15 型脉冲信号发生器前面板结构图

① 调节“频率粗调”和“频率细调”旋钮可实现脉冲频率在  $1\text{kHz}\sim 100\text{MHz}$  范围内的连续调整。“频率粗调”分为  $1\text{kHz}$ 、 $3\text{kHz}$ 、 $10\text{kHz}$ 、 $100\text{kHz}$ 、 $300\text{kHz}$ 、 $1\text{MHz}$ 、 $3\text{MHz}$ 、 $10\text{MHz}$ 、 $30\text{MHz}$ 、 $100\text{MHz}$  十个挡级。

“频率细调”用于精细调整脉冲频率，顺时针旋转，频率升高，反之降低。顺时针旋转“频率细调”旋钮到底时的脉冲频率为“频率粗调”挡的频率，逆时针旋转到底时的脉冲频率比“频率粗调”挡低一挡。例如，“频率粗调”置于  $10\text{kHz}$  挡，“频率细调”旋钮顺时针旋转到底时的脉冲频率为  $10\text{kHz}$ ，逆时针旋转到底时的脉冲频率为  $3\text{kHz}$ 。

② 调节“延迟粗调”和“延迟细调”旋钮可实现延迟时间在  $1\mu\text{s}\sim 300\text{ns}$  范围内的连续调整。“延迟粗调”分为  $5\text{ns}$ 、 $10\text{ns}$ 、 $30\text{ns}$ 、 $100\text{ns}$ 、 $300\text{ns}$ 、 $1\mu\text{s}$ 、 $3\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$  十个挡级。

顺时针旋转“延迟细调”旋钮，延迟时间增大；反之减小。顺时针旋转“延迟细调”旋钮到底时的延迟时间比“延迟粗调”挡高一挡，逆时针旋转到底时为“延迟粗调”挡的延迟时间。例如，“延迟粗调”置于  $30\text{ns}$  挡，“延迟细调”顺时针旋转到底时的延迟时间为  $100\text{ns}$ ，逆时针旋转到底时的延迟时间为  $30\text{ns}$ 。

③ 调节“脉宽粗调”和“脉宽细调”旋钮可以实现脉宽从  $1\mu\text{s}\sim 300\text{ns}$  的连续调整。“脉宽粗调”分为  $5\text{ns}$ 、 $10\text{ns}$ 、 $30\text{ns}$ 、 $100\text{ns}$ 、 $300\text{ns}$ 、 $1\mu\text{s}$ 、 $3\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$  十个挡级。

顺时针旋转“脉宽细调”旋钮脉宽增大，反之减小。逆时针旋转“脉宽细调”旋钮到底时的脉宽为“脉宽粗调”挡的脉宽，顺时针旋转到底时比“脉宽粗调”挡高一挡。例如，“脉宽粗调”旋钮置于  $10\text{ns}$  挡，“脉宽细调”旋钮顺时针旋转到底时脉宽为  $30\text{ns}$ ，逆时针旋转到底时脉宽为  $10\text{ns}$ 。

④ 调节“极性选择”旋钮可以改变脉冲信号发生器输出正、负脉冲或正、负倒置脉冲中的一种。

⑤ 调节“偏移”旋钮可改变输出脉冲对地的参考电平，即直流偏置。

⑥ 调节“衰减”和“幅度”调节旋钮，可实现输出脉冲幅度从  $150\text{mV}\sim 5\text{V}$  的调整。

## 2. 使用注意事项

使用 XC-15 型脉冲信号发生器需要注意以下事项：

① 不能空载使用，必须接入  $50\Omega$  负载，并尽量避免接入感性或容性负载，以免引起波形畸变。



② 开机预热 15min 后, 仪器方能正常工作。



## 本章小结

本章介绍了常用信号发生器的基本知识。

(1) 信号发生器包括正弦、脉冲、函数、随机信号发生器和专用信号发生器。

(2) 信号发生器的性能指标包括频率特性、输出特性和调制特性等。正弦信号发生器的调制方式一般分为调幅和调频。调幅通常用在高频信号发生器, 调制频率常用 400Hz、1kHz。超高频信号发生器往往同时具有调幅、调频、调相、脉冲调制等多种调制功能。

(3) 信号发生器功率输出时应注意输出阻抗的匹配连接, 只有在匹配连接正常情况下才能更好工作。

(4) 低频信号发生器的组成主要包括主振器、电压放大器、输出衰减器、功率放大器、阻抗变换器等。高频信号发生器的组成主要包括主振器、调制级、输出级、内调制振荡器等。

(5) 合成信号发生器是采用了频率合成技术的正弦信号发生器。合成信号发生器具有频率稳定性和频谱纯度极高的特点。

(6) 函数信号发生器是一种宽频带多波形信号发生器, 可以产生正弦波、方波、三角波等波形。函数信号发生器信号产生方式有多种, 例如脉冲式等。

(7) 脉冲信号发生器用于产生频率、脉宽和幅度可调的脉冲信号, 一般以矩形脉冲为标准信号输出。矩形脉冲主要有单脉冲和双脉冲两种。

(8) 矩形单脉冲的表征量有周期、频率、脉冲幅度、上升时间、下降时间、脉冲宽度等。



## 习题 2

1. 按照输出信号波形的不同, 信号发生器分为哪几类? 各有什么用途?
2. 高、低频正弦信号发生器的输出阻抗一般是多少? 信号发生器功率输出时, 应注意什么问题? 为什么?
3. 请结合 XFG-7 型信号发生器面板图, 谈谈怎样正确使用高频信号发生器?
4. 结合所学知识, 谈谈如何得到宽频带、频率连续可调的高稳定度、高纯度信号?
5. 结合图 2.13, 简要分析说明脉冲式函数信号发生器产生多个函数信号的原理?
6. 函数信号发生器与正弦信号发生器有什么异同点?
7. 结合图 2.17, 简要说明如何正确使用函数信号发生器?
8. 文氏桥式振荡器与差频式振荡器有什么区别?
9. 脉冲信号发生器一般以什么波形为标准输出?
10. 矩形单脉冲的表征量有哪些? 各自是如何定义的?
11. 结合图 2.21, 谈谈如何正确操作使用脉冲信号发生器?

# 第 3 章 电压测量与电压表



**学习参考：**电压是最基本的被测量，电压表是三大电子测量仪器之一。要求通过学习了解电流的测量方法，理解电压表的工作原理，熟练掌握电压表的使用方法及读数换算方法，明确积分式 A/D 变换器的工作原理，了解逐次比较式、三次积分式 A/D 变换器的工作原理。

**本章要点：**交流电压的表征，模拟式交流电压表的结构、检波器、正弦波有效值定度及电压测量，数字电压表的组成、性能指标及 A/D 变换器。

## 3.1 概述

电压测量是电子测量的基础，基本的电压测量仪器是电压表。电压表、示波器、计数器是电子测量的三大仪器。

### 3.1.1 电压测量的基本要求

在实际测量中，被测电压具有频率范围宽、幅度差别大、波形种类多等特点。电压测量应满足下列基本要求。

#### 1. 频率范围宽

被测电压的频率范围自零赫兹至数百兆赫兹，大致分为直流、低频、视频、高频和超高频等。所用电压表必须具有足够宽的频率范围。

#### 2. 量程宽

被测电压的量值范围很宽，小到几纳伏，大到几百伏、几千伏，甚至几万伏。测量之前，应对被测电压有大概的估计，所用电压表应具有相当宽的量程或具有针对性。测量小信号电压时应选用高灵敏度电压表，测量高电压时应选用绝缘强度高的电压表。

#### 3. 输入阻抗高

测量电压时，电压表等效为输入电阻  $R_i$  和输入电容  $C_i$  的并联，其输入阻抗 ( $R_i/C_i$ ) 是被测电路的额外负载。为了使被测电路的工作状态尽量少受影响，电压表应具有足够高的输入阻抗，即  $R_i$  应尽量大、 $C_i$  应尽量小。

低频测量时，因为交流电压表的输入电阻、输入电容一般为  $1M\Omega$ 、 $1\sim 10pF$ ，二者对被测电路的影响很小，故一般不考虑电压表输入阻抗对被测电路的影响。但在高频测量时，输入电阻  $R_i$  和输入电容  $C_i$  的容抗将变小，二者对被测电路的影响变大，一般要考虑电压表输入阻抗的影响，当它的影响不可忽略时，应对测量结果进行修正。



#### 4. 抗干扰能力强

测量工作一般是在受各种干扰的情况下进行的。当利用电压表进行高灵敏度测量时, 干扰会引入明显的测量误差, 这就要求电压表具有较强的抗干扰能力。必要时, 应采取一些抗干扰措施, 如良好接地、使用短的测试线、进行屏蔽等, 以减小干扰的影响。

#### 5. 测量精确度高

直流电压的测量可获得较高的测量精确度, 例如直流数字电压表一般可达  $10^{-4} \sim 10^{-7}$  量级; 交流电压表的测量精确度可达  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  量级。在测量精确度要求不高时, 可选用测量精确度在  $(1 \sim 3)\%$  左右的电压表。电压表精确度表示方法如下。

(1) 满度值的百分数  $\pm\beta\% U_m$

具有线性刻度的模拟式电压表一般采用这种表示方法, 式中  $\pm\beta\%$  为满度相对误差,  $U_m$  为电压表满刻度值。

(2) 读数值百分数  $\pm\alpha\% U_x$

具有对数刻度的电压表一般采用这种表示方法, 式中  $\pm\alpha\%$  为读数相对误差,  $U_x$  为电压表测量读数值。

(3)  $\pm(\alpha\% U_x + \beta\% U_m)$

数字电压表一般采用这种表示方法。

#### 6. 被测电压波形种类多

不同类型电压表的适用对象和使用方法是不同的, 测量时, 应根据电压表的类型和电压波形来确定被测电压的大小。

### 3.1.2 交流电压的表征

交流电压的表征量包括平均值  $\bar{U}$ 、峰值  $\hat{U}$ 、有效值  $U$  以及波形因数  $K_F$ 、波峰因数  $K_P$ 。

#### 1. 平均值 $\bar{U}$

平均值简称为均值, 是指波形中的直流成分, 所以纯交流电压的平均值为零。为了更好地表征交流电压的大小, 交流电压的平均值特指交流电压经过均值检波后波形的平均值, 它分为半波平均值  $\bar{U}_{1/2}$  和全波平均值  $\bar{U}$ 。如无特别说明, 纯交流电压的平均值均为全波平均值  $\bar{U}$ 。

$$\bar{U}_{+1/2} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad u(t) \geq 0, 0 \leq t < T$$

$$\bar{U}_{-1/2} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad u(t) \leq 0, 0 \leq t < T$$

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \quad 0 \leq t < T$$

式中,  $\bar{U}_{+1/2}$ 、 $\bar{U}_{-1/2}$  分别为正、负半波平均值;  $\bar{U}$  为全波平均值;  $T$  为被测电压  $u(t)$  的周期。

对于纯交流电压, 存在关系

$$|\bar{U}_{+1/2}| = |\bar{U}_{-1/2}| = \frac{\bar{U}}{2}$$





2. 峰值  $\hat{U}$

交流电压的峰值是指交流电压在一个周期内（或一段时间内）以零电平为参考基准的最大瞬时值，记为  $\hat{U}$ （或  $U_P$ ），分为正峰值  $\hat{U}_+$ （或  $U_{P+}$ ）和负峰值  $\hat{U}_-$ （或  $U_{P-}$ ）。

一般情况下，正峰值  $\hat{U}_+$  和负峰值  $\hat{U}_-$  并不相等，峰值与振幅值  $U_m$  也不相等，这是因为振幅值是以电压波形的直流成分为参考基准的最大瞬时值。

对于双极性对称的纯交流电压，数值上存在关系

$$\bar{U}_+ = \bar{U}_- = U_m = \hat{U}$$

经常用到的交流电压表征量还有谷值  $\bar{U}$  和峰-峰值  $U_{P-P}$ ，如图 3.1 所示，注意  $\bar{U}'$  是未经均值检波的波形平均值。

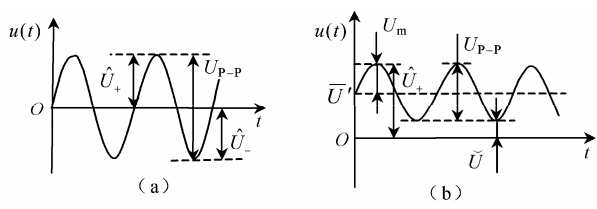


图 3.1 交流电压的峰值、振幅值

3. 有效值  $U$

交流电压的大小通常是指它的有效值  $U$ ，有效值又称为方均根值，是根据它的物理定义来确定的。数学计算式为

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

4. 波形因数  $K_F$

交流电压的波形因数  $K_F$  定义为交流电压的有效值  $U$  与平均值  $\bar{U}$  之比，即

$$K_F = \frac{U}{\bar{U}}$$

5. 波峰因数  $K_P$

交流电压的波峰因数  $K_P$  定义为交流电压的峰值  $\hat{U}$  与有效值  $U$  之比，即

$$K_P = \frac{\hat{U}}{U}$$

不同波形的波形因数和波峰因数具有不同的定值，如表 3-1 和图 3.2 所示。

表 3-1 常见波形的波形因数和波峰因数

名称	波形	$\hat{U}$	$U$	$\bar{U}$	$K_F$	$K_P$
正弦波	①	$A$	$A/\sqrt{2}$	$0.637A$	$1.11$	$\sqrt{2}$
方波	②	$A$	$A$	$A$	$1$	$1$
三角波	③	$A$	$A/\sqrt{3}$	$0.5A$	$2/\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$

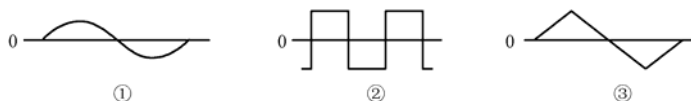


图 3.2 表 3-1 所用波形图

### 3.1.3 电子电压表的分类

电子电压表简称为电压表，分为模拟式电压表和数字式电压表。

#### 1. 模拟式电压表

模拟式电压表即指针式电压表，它用磁电式直流电流表（俗称表头）作为指示器，有直流电压表和交流电压表之分。

直流电压表是构成交流电压表的基础，用于测量直流电压。

交流电压表用于测量交流电压。测量时，首先利用交直流变换器将交流变成直流，再依照测量直流电压的方法进行测量，其核心为交直流变换器 AC/DC。一般利用检波器来实现交直流变换。检波器按其响应特性分为均值、峰值和有效值检波器三种。

按照测量电压频率范围的不同，交流电压表还可分为超低频电压表（低于 10Hz）、低频电压表（低于 1MHz）、视频电压表（低于 30MHz）、高频或射频电压表（低于 300MHz）和超高频电压表（高于 300MHz）。

为了满足不同测量对象的要求，模拟式交流电压表有放大—检波式、检波—放大式和外差式等三种不同的结构形式。

##### （1）检波—放大式电压表

检波—放大式电压表组成框图如图 3.3（a）所示。这种电压表的频率范围和输入阻抗主要取决于检波器。采用超高频检波二极管时，可使这种表的频率范围从几十赫兹至数百兆赫兹，甚至可达 1GHz，输入阻抗也比较大，一般称之为高频毫伏表或超高频毫伏表。为了使测量灵敏度不受直流放大器零点漂移等的影响，一般利用调制式（即斩波式）直流放大器放大检波后的直流信号。而且将检波器做成探头直接与被测电路连接，从而减小分布参数及外部干扰信号的影响。目前，高频毫伏表的灵敏度已由以前的约 0.1V 提高到了毫伏级。如国产 DA36 型超高频毫伏表即采用了调制式直流放大器，其频率范围为 10kHz~1000MHz，电压范围为 1mV~10V，3V 量程，100kHz 时的输入阻抗大于 100kΩ，50MHz 时的输入阻抗大于 50kΩ。

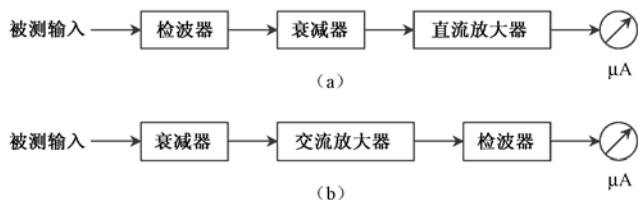


图 3.3 检波—放大式、放大—检波式电压表组成框图

##### （2）放大—检波式电压表

放大—检波式电压表的组成框图如图 3.3（b）所示。由于宽带放大器增益与带宽的矛盾（二者乘积为常数），使放大—检波式电压表的频宽难以扩展，灵敏度也受到内部噪声和外部



干扰的限制。其频率范围一般为 20Hz~10MHz，灵敏度达毫伏级，通常称之为视频毫伏表，多用在低频、视频场合，如 S401 型视频毫伏表的频率范围为 20Hz~10MHz，电压测量范围为 100μV~1V，输入电阻不小于 1MΩ，输入电容不大于 20pF。

(3) 外差式电压表

外差式电压表又称为选频电压表或测量接收机，其组成框图如图 3.4 所示。虽然也属于放大—检波式，但因外差式电压表利用混频器，将输入信号变为固定中频信号后进行交流放大，可以较好地解决交流放大器增益与带宽的矛盾，其灵敏度可以提高到微伏级。其频带范围从 100kHz 至数百兆赫兹，一般称之为高频微伏表。如 DW-1 型高频微伏表，最小量程为 15μV，最大量程为 15mV（加衰减器可扩展至 1.5V），频率范围为 100kHz~300MHz，分 8 个频段，基本误差为±3%。

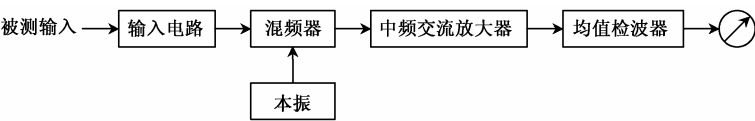


图 3-4 外差式电压表组成框图

外差式电压表的频率范围取决于本振频率范围。只有当本振频率可以达到很高时，电压表的频率范围才能更宽。但当本振频率很高时，不仅对本振电路的屏蔽要求更高，而且电压表造价也要提高。若屏蔽不良，本振会对电压表产生干扰而降低测量准确度。所以外差式电压表一般为高频电压表而不是超高频电压表。

三种结构形式电压表的性能比较如表 3-2 所示。

表 3-2 三种结构形式电压表的性能比较

结 构 形 式	灵 敏 度	频 带 宽 度	电压表类型
外差式（选频电压表、测量接收机）	很高	较宽	高频微伏表
检波—放大式（利用调制式直流放大器）	较高	很宽	超高频毫伏表
放大—检波式	较高	较窄	高频毫伏表、视频毫伏表

此外，还有热偶式电压表。热偶元件是由两种不同材料的导体连接而成的具有热电现象的元件。热偶式电压表是将被测电压加在电热丝上对热偶元件加热而产生热电势，再根据热电势与所加电压的函数关系测出被测电压。

热偶式电压表的优点是测量结果与被测信号波形无关，是一种真正的有效值电压表，可以测量直流及零至上百兆赫兹的交流信号。例如，DA24 型热偶表的频率范围为 10Hz~10MHz，最小量程为 300V，满度误差为±1.5%。热偶式电压表的缺点是灵敏度低、输入电阻低、受环境温度影响大、个别电压表的刻度非线性。

2. 数字式电压表

数字式电压表（DVM, Digital Voltmeter）是利用 A/D（模/数）变换器将模拟量变换成数字量，并以十进制数字形式显示被测电压值的一种电压测量仪器。

最基本的数字电压表是直流数字电压表。直流数字电压表配上交直流变换器即构成交流数字电压表。如果在直流数字电压表的基础上，配上交流电压/直流电压（AC/DC）变换器、



电流/直流电压 (I/V) 变换器和电阻/直流电压 (R/V) 变换器, 就构成数字万用表 (DMM, Digital Multimeter)。万用表的内容本书不予讨论。

直流数字电压表的核心是 A/D 变换器。A/D 变换器分为积分式、比较式和复合式三种类型, 直流数字电压表也分为积分式、比较式和复合式三种类型。目前, 应用较多的是双积分式 DVM, 其次是逐次比较式 DVM。随着科学技术的发展和对测量要求的提高, 现在已有复合式 DVM 和双积分式 DVM 的改进型——三次积分式 DVM 等多种类型的数字电压表供应市场。

数字电压表由模拟电路、数字逻辑电路和显示电路三大部分组成, 如图 3.5 所示。图中 A/D 变换器是数字电压表的核心, 它将模拟电压变换成数字量, 然后由数字逻辑电路进行计数, 并由显示电路显示出被测电压的数值。A/D 变换器与数字逻辑电路、显示电路一起构成数字电压表表头。

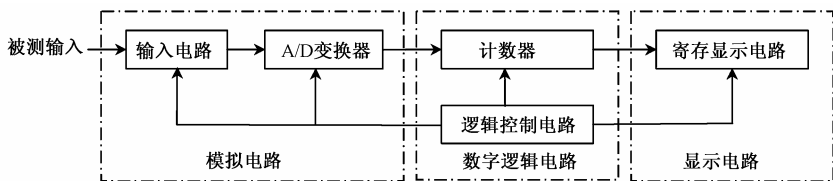


图 3.5 数字电压表组成框图

数字电压表还具有测量准确度高、分辨力强、测速快、输入阻抗高、过载能力强、抗干扰能力强等优点。由于微处理器的应用, 目前高中档数字电压表已普遍具有数据存储、自检等功能, 并配有标准接口, 可以方便地构成自动测试系统。而模拟式电压表具有结构简单, 价格低廉, 频率范围宽等特点, 并且还可以更直观地观测信号电压变化情况。因此数字式电压表还不能完全代替模拟式电压表。

## 3.2 直流电流、直流电压的测量

### 3.2.1 直流电流的测量

磁电式直流电流表 (即表头) 可以直接用来测量较小的直流电流, 测量时应与被测电路串联, 而且允许通过的电流较小, 如果电流过大, 将损坏表头, 通常用作检流计、微安表和小量程毫安表。

为了扩大表头的电流量程, 常采用与表头并联电阻的方法, 此并联电阻称为分流电阻或分流器, 如图 3.6 所示。图 3.6 (a) 和图 3.6 (b) 所示分别为开路式分流器和闭路式环形分流器。改变分流器阻值的大小可以改变电流表的量程,  $R_p$  为电流表表头内阻。

在图 3.6 中, 由于被测电流  $I_x$  的一部分被分流电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分流, 而使流过表头的电流  $I_A$  仍然能够维持在额定范围内而不会损坏表头, 但因为表盘刻度是以被测电流的大小进行刻度的, 所以能够直接测出被测电流的大小。改变量程变换开关 S 的位置, 接入不同的分流电阻  $R_1$ 、 $R_2$  或  $R_3$ , 就可以测量不同大小的电流  $I_x$ 。

开路式分流器量程变换开关的接触电阻对分流器电阻值的影响很大, 尤其是对大电流量程, 严重时会烧毁仪表, 所以很少采用。大多数多量程电流表采用环形分流器。

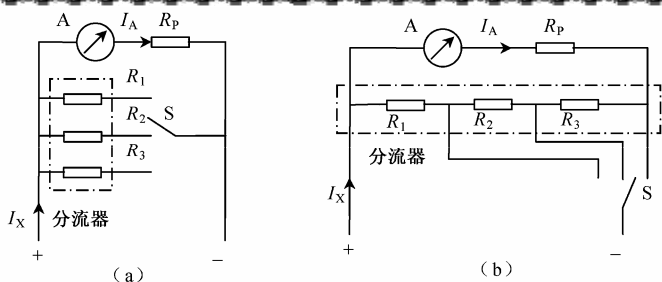


图 3.6 多量程电流表电路连接示意图

一般选用电流表或万用表测量电流。测量时，仪表不能并接于被测电路两端，而应将仪表串接入被测电路中。测量直流电流时，应注意使被测电流经正表笔（“+”端）流入仪表，由负表笔（“-”端）流出。如果不知被测电流的正负极性可以将万用表量程开关打在最大量程，瞬间测量一下，观察表针偏转方向，如果正偏，说明接法正确，反偏则应调换表笔位置。另外，还应注意选用合适的量程进行测量，不知被测电流范围时，可从最大量程量起，逐渐变小量程，直至量程合适为止。

### 3.2.2 直流电压的测量

磁电式电流表指针偏转角度 $\alpha$ 与被测电流 $I$ 成正比，当它具有一定内阻时，偏转角度与其两端的电压也成正比，它可用于测量直流电压。但因为表头内阻不大，允许通过的电流又小，所以测量电压的范围很小，一般为毫伏级。为了测量大电压，常将表头与电阻串联，此电阻称为分压电阻，如图 3.7 所示。改变分压电阻可以改变电压表的量程。

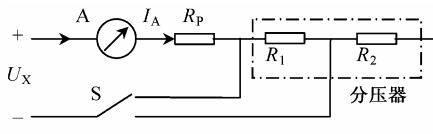


图 3.7 多量程电压表电路连接示意图

一般选用直流电压表或万用表测量直流电压。测量电压时，应将仪表并接于被测电路的两端，不能与被测电路串接。测量直流电压时，注意电压表正表笔（“+”端）接被测电压的高电位，负表笔（“-”端）接低电位，不能接反。此外，应选用合适的量程。

除了用电压表测量电压外，还可以利用示波器、失真度测量仪、频谱仪等仪器来测量电压。电压表和示波器是电压测量的基本仪器，但示波器能够直接测量出交流电压的瞬时值，而电压表却不能测量出交流电压的瞬时值。

## 3.3 模拟式交流电压表

模拟式交流电压表按照所用检波器类型的不同，分为均值电压表、峰值电压表和有效值电压表。均值电压表选用均值检波器，采用放大—检波式结构，属于低频电压表。峰值电压表选用峰值检波器，一般采用检波—放大式结构，属于高频电压表。有效值电压表选用有效值检波器，一般为低频电压表。



### 3.3.1 均值电压表

均值电压表以均值检波器作为交直流变换器。均值检波器即整流器，因其输出的直流电压（即检波后波形的平均值）与输入交流电压的平均值成正比，故称为均值检波器。检波器输入电压与输出电压之间的关系称为检波器的响应特性。因为均值电压表指针偏转角度与被测交流电压的平均值成正比，故交流电压平均值称为均值检波器或均值电压表的实际响应值。

#### (1) 均值检波器

常用均值检波器电路如图 3.8 所示，图 3.8 (a) ~ 图 3.8 (d) 分别为桥式、半桥式全波均值检波器，以及半波整流式、加隔直电容的半波整流式均值检波器，电容  $C$  为滤波电容。比较常用的是图 3.8 (b) 和图 3.8 (d) 所示的均值检波器。

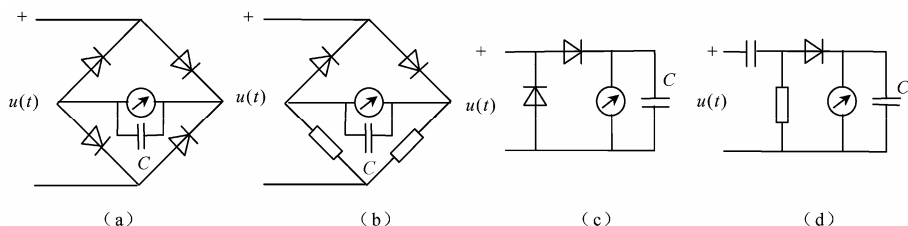


图 3.8 常用均值检波器

均值检波器输出的直流电压即电容  $C$  两端的电压，设为  $\bar{U}_C$ 。经推导得知，桥式、半桥式检波器满足关系： $\bar{U}_C = \bar{U}$ ， $\bar{U}$  为输入交流电压的平均值；半波整流式检波器满足关系： $\bar{U}_C = \bar{U}/2$ 。分析检波器的工作波形，可见均值检波器的输出始终等于整流后波形的平均值。

图 3.9 (a) 和图 3.9 (b) 为 JB-F1 型、JB-1B 型均值电压表检波器。图 3.9 (a) 中的  $VD_3$  用以保护微安表不致因过载而损坏。图 3.9 (b) 所示电路中， $VD_1 \sim VD_4$  构成全桥式检波器， $R_1$ 、 $C_2$  组成滤波器， $R_2$ 、 $VD_5$  为线性补偿电路，当信号较低时，由于二极管的非线性，表头电流偏小，此时， $R_2$  和  $VD_5$  的分流作用减小，使表头电流有所增加，起到线性补偿作用；当信号频率过低 ( $2 \sim 10\text{Hz}$ ) 时，闭合开关  $S$  可以减小小指针摆动，称之为阻尼开关。

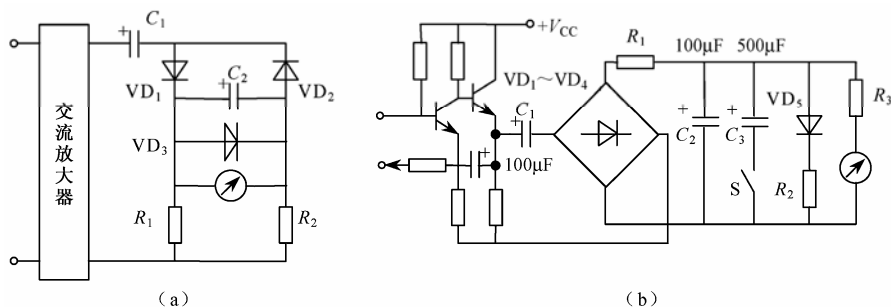


图 3.9 均值检波器实例

#### (2) 正弦波有效值定度与读数值的修正

交流电压表一般以输入正弦波有效值的大小来定度，即正弦波有效值定度。当测量正弦波电压时，正弦波的有效值  $U$  就等于均值电压表的读数值  $U_a$ ，即  $U = U_a$ ；当测量非正弦波电压时，均值电压表的读数值无明确的物理意义，只说明非正弦波电压平均值与读数值相等



的正弦波电压的平均值相等。

测量非正弦波电压时, 均值电压表读数值的修正方法是

$$\bar{U}_N = \bar{U}_\sim = U_\sim / K_{F\sim} = 0.9U_\alpha$$

$$U_N = \bar{U}_N K_{FN}$$

$$\hat{U}_N = U_N K_{PN}$$

$$K_\alpha = \frac{U_\alpha}{\bar{U}_\sim} = 1.11$$

式中,  $K_\alpha$  为电压表的定度系数, 反映的是电压表实际响应值  $\bar{U}$  与读数值  $U_\alpha$  之间的关系;  $\bar{U}_\sim$  为正弦波平均值;  $\bar{U}_N$ 、 $U_N$ 、 $\hat{U}_N$ 、 $K_{FN}$ 、 $K_{PN}$  分别为非正弦波的平均值、有效值、峰值、波形因数和波峰因数。常见波形的波形因数、波峰因数的大小, 可查阅表 3-1。

不管选用何种检波器, 对均值电压读数值的修正均可用上述方法进行。

**【例 3-1】**用均值电压表测量正弦波、三角波电压时, 已知电压表的读数均为 20V, 试分别计算正弦波、三角波电压的有效值、平均值和峰值各是多少伏?

解: 测量正弦波时

$$U_\sim = U_\alpha = 20V$$

$$\bar{U}_\sim = 0.9U_\alpha = 0.9 \times 20V = 18V$$

$$\hat{U}_\sim = \sqrt{2}U_\alpha = \sqrt{2} \times 20V \approx 28.3V$$

测量三角波时

$$\bar{U}_\Delta = 0.9U_\alpha = 0.9 \times 20V = 18V$$

$$U_\Delta = K_{F_\Delta} \bar{U}_\Delta = 2/\sqrt{3} \times 18V \approx 20.8V$$

$$\hat{U}_\Delta = K_{P_\Delta} U_\Delta = \sqrt{3} \times 20.8V \approx 36.0V$$

答: (略)。

### (3) 均值电压表的组成

经推导得知, 全波均值检波器输入电阻  $R_i = 2R_d + \frac{8}{\pi^2}R_m$ , 而二极管正向导通电阻  $R_d$  和电流表内阻  $R_m$  的大小一般为  $100 \sim 500\Omega$ 、 $1\Omega \sim 2k\Omega$ , 则全波均值检波器的输入电阻  $R_i = 1 \sim 3k\Omega$ , 不满足电压表高输入阻抗的要求, 所以均值电压表的结构不可以是检波—放大式, 否则, 将严重影响被测电路的工作状态。均值电压表的组成如图 3.10 所示, 属于放大—检波式电压表。



图 3.10 均值电压表组成框图

阻抗变换器是均值电压表的输入级, 通常利用射极跟随器或源极跟随器来提高均值电压表的输入阻抗。可变量程衰减器通常是阻容分压器, 用于改变均值电压表的量程。宽带交流放大器是决定均值电压表性能的关键器件, 用于信号放大, 以提高均值电压表的测量灵敏度。

均值电压表属于低频电压表, 它的灵敏度可以达到毫伏数量级, 频率范围一般为  $20Hz \sim 10MHz$ , 故又称之为视频毫伏表。均值电压表的型号很多, 如 SX-2172 型、DA-16 型、DA-12 型、GB-9 型、GB-10 型、AS2292 型等。



#### (4) 误差分析

均值电压表测量误差的主要来源包括：指示电流表的误差、检波元器件的不稳定性误差、波形误差及频率误差等。在此主要分析波形误差和频率误差。

##### 1) 波形误差

波形误差是在用均值电压表测量非正弦波电压时，将电压表的读数当被测电压的有效值而产生的误差。

波形误差的绝对误差为

$$\Delta U = U_{\alpha} - 0.9K_{FN}U_{\alpha} = (1 - 0.9K_{FN})U_{\alpha}$$

波形误差的示值相对误差为

$$\gamma_{\alpha} = \Delta U / U_{\alpha} = 1 - 0.9K_{FN}$$

例如，测量三角波时的波形误差为

$$\gamma_{\alpha} = 1 - 0.9K_{F_{\Delta}} = 1 - 0.9 \times \frac{2}{\sqrt{3}} \approx -3.5\%$$

因此，在使用电压表测量非正弦波电压时，应注意电压表的类型，正确理解读数的含义，并进行修正。

##### 2) 频率误差

频率误差是在检波器对高频输入信号检波时，由于二极管结电容容抗减小而使本应处于截止状态的二极管失去单向导电性而带来的高频频响误差。图 3.11 所示为图 3.8 (a) 均值检波器负半周内的高频等效电路，图中  $R_d$ 、 $C_d$  为二极管的正向导通电阻和结电容； $L$ 、 $R_m$  为电流表的等效电感及内阻。低频时， $C_d$  的容抗很大，二极管处于截止状态。高频时， $C_d$  的容抗变小而产生分流，导致误差的产生，该误差称为频率误差。例如，SX2172 型交流毫伏表 20Hz~100kHz 的频率误差为  $\pm 2\%$ ；10Hz~500kHz 时为  $\pm 5\%$ ；5Hz~2MHz 时为  $\pm 10\%$ 。

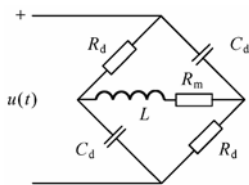


图 3.11 图 3.8 (a) 均值检波器负半周高频等效电路

除此之外，交流放大器增益与带宽的矛盾也是产生频率误差的原因之一。

### 3.3.2 峰值电压表

测量用高频交流电压表一般为峰值电压表，峰值电压表以峰值检波器为交直流变换器。峰值检波器因其输出的直流电压与输入交流电压的峰值成正比而得名。因此，峰值电压表指针偏转角度与被测交流电压的峰值成正比，交流电压的峰值称为峰值检波器的实际响应值。

#### 1. 峰值检波器

图 3.12 为几种常见峰值检波器。图 3.12 (a) 所示为串联式峰值检波器，又称为开路式峰值检波器，即包络检波器；图 3.12 (b) 所示为并联式峰值检波器，又称为闭路式峰值检波器。串联式峰值检波器和并联式峰值检波器输出电压  $\bar{U}_R \approx \hat{U}$ 。图 3.12 (c) 为双峰值检波器，





是两个串联峰值检波器的组合， $\bar{U}_R \approx U_{p-p}$ ；图 3.12 (d) 和图 3.12 (e) 所示为倍压式峰值检波器。图 3.12 (d) 所示的结构为桥式，图 3.12 (e) 所示是并联、串联峰值检波器的组合， $\bar{U}_R \approx 2\hat{U}$ 。

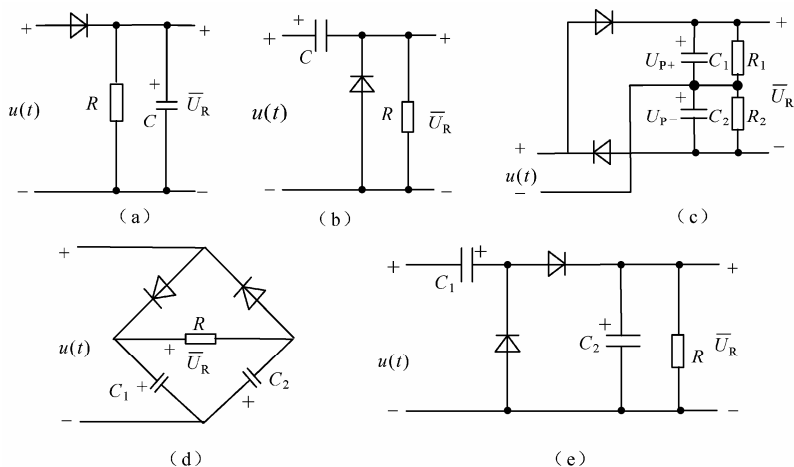


图 3.12 常见峰值检波器

串联式峰值检波器中的电容  $C$  起到滤波和检波的作用，无隔直作用，所以检波器的实际响应值应为交流电压实际波形的峰值  $\hat{U}$ 。并联式峰值检波器中的电容  $C$  既为隔直电容又是检波电容，所以检波器的实际响应值为交流电压的振幅  $U_m$ 。除少数情况下，一般采用并联式峰值检波器或双峰值检波器。如无特别说明，峰值检波器均特指为并联式峰值检波器。

虽然图 3.12 (a)、图 3.12 (b) 所示电路与图 3.8 (d) 所示的电路形式相似，但前者必须满足峰值检波条件，即充电时间常数  $R_d C \ll T_{\min}$ ，放电时间常数  $RC \gg T_{\max}$ ， $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$  为输入信号最小周期和最大周期， $R_d$  为二极管正向导通电阻。而后者的充放电时间常数近似相等。

图 3.13 (a) 为 HFG-1B 型高频毫伏表的并联式峰值检波器，其中  $C_1$ 、 $VD_1$ 、 $R_2$  为检波电容、检波二极管、检波负载电阻， $R_1$  和  $C_2$  组成滤波器。在  $R_2$  与调制放大器之间的双 T 形

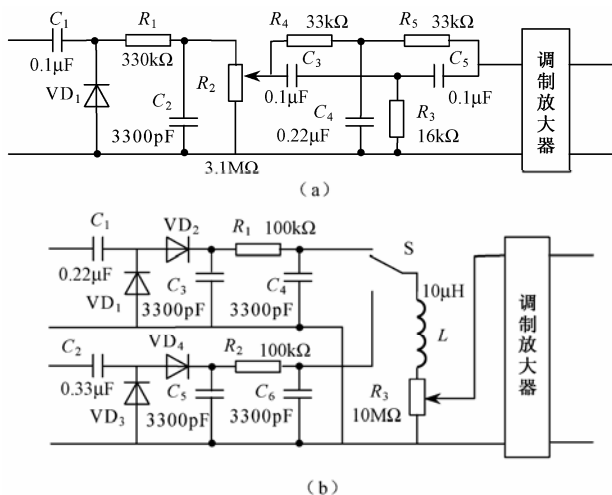


图 3.13 峰值检波器实例



网络,可以防止 50Hz 干扰信号串入调制放大器。 $C_1$  的取值视被测电压频率范围而定。从扩展上限频率的角度来看, $C_1$  应小一些,从扩展下限频率角度来看, $C_1$  应大一些。

图 3.13 (b) 为 DA-4 型高频毫伏表的双峰值检波器。为了扩展频率范围,检波器利用了两个探头,上下两部分分别为高频探头和低频探头。 $R_3$  为检波负载电阻, $R_1$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  与  $L$  构成滤波器, $VD_2$  与其右边元器件构成串联式峰值检波器, $VD_1$ 、 $C_1$  与右边元器件构成并联式峰值检波器。低频探头与高频探头的构成相似。

## 2. 读数值的修正

峰值电压表也以正弦波有效值进行定度。当测量正弦波电压时,正弦波电压有效值  $U_{\sim}$  等于电压表的读数值  $U_{\alpha}$ ,即  $U_{\sim}=U_{\alpha}$ 。当测量非正弦波电压时,电压表的读数值  $U_{\alpha}$  没有明确的物理意义,只说明非正弦电压的峰值与读数值相等的正弦波的峰值相等。

测量非正弦波电压时,非正弦波电压有效值等的计算如下:

$$\hat{U}_N = \hat{U}_{\sim} = \sqrt{2}U_{\alpha} \quad (3-1)$$

$$U_N = \hat{U}_N / K_{PN} \quad (3-2)$$

$$\bar{U}_N = U_N / K_{FN}$$

$$K_{\alpha} = \frac{U_{\alpha}}{\hat{U}_{\sim}} = \sqrt{2}/2$$

式中, $K_{\alpha}$  为峰值电压表的定度系数, $\hat{U}_{\sim}$  为正弦波峰值电压。

采用串联式峰值检波器时,式 (3-1)、式 (3-2) 中的峰值为交流电压实际波形的峰值;而采用并联式峰值检波器时,式 (3-1)、式 (3-2) 中的峰值为纯交流电压波形的峰值,即交流电压波形的振幅值。

**【例 3-2】**用峰值电压表测量正弦波、三角波电压,已知电压表的读数均为 20V,试分别计算正弦波、三角波的有效值、平均值和峰值各是多少伏?

**解:** 测量正弦波时:

$$U_{\sim} = U_{\alpha} = 20V$$

$$\bar{U}_{\sim} = 0.9U_{\alpha} = 0.9 \times 20V = 18V$$

$$\hat{U}_{\sim} = \sqrt{2}U_{\alpha} = \sqrt{2} \times 20V \approx 28.3V$$

测量三角波时:

$$\hat{U}_{\Delta} = \sqrt{2}U_{\alpha} = \sqrt{2} \times 20V \approx 28.3V$$

$$U_{\Delta} = \hat{U}_{\Delta} / K_{p_{\Delta}} = \hat{U}_{\Delta} / \sqrt{3} = 28.3V / \sqrt{3} \approx 16.3V$$

$$\bar{U}_{\Delta} = U_{\Delta} / K_{F_{\Delta}} = \frac{16.3V}{2/\sqrt{3}} \approx 14.1V$$

答: (略)

## 3. 峰值电压表的组成

串联式、并联式峰值检波器的输入阻抗分别为负载电阻  $R$  的 1/2 和 1/3 倍, $R$  通常取值为几兆欧姆至几百兆欧姆,故峰值检波器的输入阻抗很高,能够与被测电路相接。峰值表的构成一般为检波—放大式,如图 3.14 所示,其中直流放大器通常为调制式直流放大器或差分放大器。由于峰值检波器体积小,故可以做成探头与被测电路直接相接,因此,通过交流信



号的测试线很短,分布参数以及引入的干扰信号比较小,而且由于采用调制式直流放大器,使得检波—放大式峰值表的频宽及灵敏度都比较理想。不过,峰值电压表的构成也可以是放大—检波式,但性能不如检波—放大式的好。这是因为放大器不仅体积大而且需要电源,所以放大器不能直接与被测电路相接,这样势必要加长测试线,从而增大了分布参数、干扰信号等对测量精度的影响;而且由于采用交流放大器,使得电压表的频宽也受到影响。

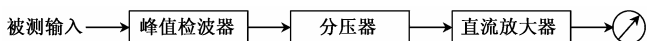


图 3.14 峰值电压表的组成

峰值表常用作超高频毫伏表,适于测量高频信号,这是由检波—放大式电压表特性所决定的。峰值电压表有很多型号,如 DA-1 型、DA-4 型、HFJ-8 型、HFJ-8A 型、DYC-5 型等。

#### 4. 误差分析

##### (1) 理论误差

因峰值检波器输出电压平均值实际上要略小于被测电压峰值  $U_p$ , 因此会产生理论误差。测量正弦波时的理论误差为

$$\gamma_T = -2.22 \left( \frac{R_d}{R} \right)^{2/3}$$

##### (2) 波形误差

峰值电压表测量非正弦波电压时,若将电压表读数值当成它的有效值也会产生波形误差。波形误差的绝对误差为

$$\Delta U = U_\alpha - \frac{\sqrt{2}}{K_{PN}} U_\alpha = \left( 1 - \frac{\sqrt{2}}{K_{PN}} \right) U_\alpha$$

波形误差的示值相对误差为

$$\gamma_\alpha = \frac{\Delta U}{U_\alpha} = 1 - \frac{\sqrt{2}}{K_{PN}}$$

例如,测量三角波时的波形误差为

$$\gamma_\alpha = 1 - \frac{\sqrt{2}}{K_{P\Delta}} = 1 - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \approx 18.4\%$$

##### (3) 频率误差

如果被测信号频率过低而不满足  $RC \ll T_{\max}$  的峰值检波条件时,由于放电时间过长,  $\bar{U}_C$  下降较多,而产生低频频率误差。低频频率误差为

$$\gamma_L = \bar{U}_C - U_p = \frac{1}{2\pi fRC}$$

除低频频率误差外,高频分布参数的影响也会带来高频误差。

频率特性误差  $\delta_{fx}$  又称为频率影响误差,是指电压表在工作频率范围内各频率点的电压值相对于基准频率电压值的误差,它反映了电压表的频率误差,计算如下:

$$\delta_{fx} = \frac{U_{fx} - U_{f0}}{U_{f0}} \times 100\%$$



式中,  $U_{f0}$  为基准频率上被测电压示值;  $U_{fx}$  为其他频率上被测电压示值。

例如, AS2271 超高频毫伏表频率特性误差, 以 100kHz 为基准, 100kHz~50MHz,  $\leq 3\%$ ; 10kHz~600MHz,  $\leq 10\%$ ; 600MHz~1GHz,  $\leq 15\%$ 。

### 3.3.3 有效值电压表

有效值电压表类型繁多, 按照所用检波器类型的不同, 可分为检波式、热偶式、计算式等。检波式有效值电压表通常选用分段逼近式有效值检波器, 如 DY-2 型有效值电压表。一般认为有效值电压表的读数就是被测电压的有效值, 而与被测电压波形无关, 称之为真有效值电压表。

#### 1. 分段逼近式有效值检波器

经推导可知, 只要电路的输出特性曲线具有平方律特性, 该电路就可以实现有效值检波。图 3.15 所示为具有平方律特性的分段逼近式有效值检波器及其输出特性曲线, 该曲线由众多不同斜率的线段构成。这些线段是由于输入电压的大小不同而改变了检波器负载电阻的大小得到的。

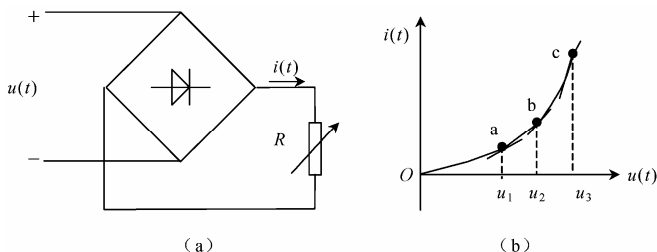


图 3.15 分段逼近式有效值检波器

分段逼近式有效值检波器的输出与交流电压有效值的平方成正比, 因此, 电压表的刻度是非线性的。

#### 2. 热偶式有效值检波器

热偶式有效值检波器即热电变换式有效值检波器, 它是根据交流电压有效值的定义, 利用具有热电变换效应的热电偶来实现有效值检波的。热偶式有效值电压表的频率范围很宽, 上限频率达几十兆赫。

图 3.16 为 DA-24 型电压表原理图。 $T_1$ 、 $T_2$  两个性能相同的热电偶构成热电偶桥, 称为双热偶变换器,  $T_2$  称为平衡热电偶。 $T_1$ 、 $T_2$  产生的热电动势分别为  $E_x = k(k_1 U_x)^2$  ( $k$  为热电偶比例常数、 $k_1$  为放大器增益)、 $E_f = k U_o^2$ , 只要直流放大器增益很大, 则输入端电压  $\Delta U = E_x - E_f \approx 0$ , 即  $U_o \approx k_1 U_x$ 。

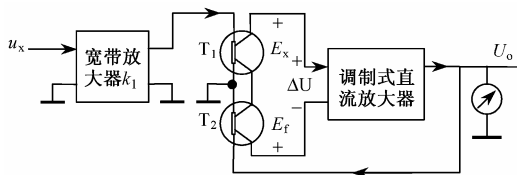


图 3.16 DA-24 型有效值电压表原理图



DA-24 型电压表频率范围为 10Hz~10MHz，最小量程为 1mV，最大量程为 300V，满度误差为±1.5%。

3. 计算式有效值检波器

计算式有效值检波器组成框图如图 3.17 所示，计算式有效值电压表是根据交流电压有效值的数学计算式，利用有关的运算电路来实现有效值检波的。

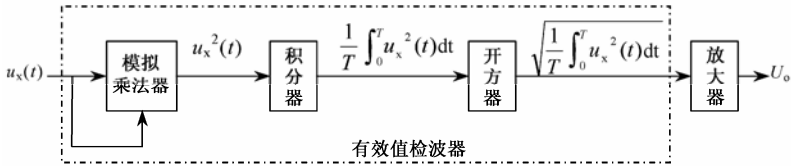


图 3.17 计算式有效值电压表组成框图

3.3.4 模拟式电压表实例

AS2292 型双输入交流电压表是一种单指针电表指示、双路输入的放大—检波式电压表。该电压表具有小型化、低噪声、高输入阻抗、高灵敏度、温度稳定性好等特点，可广泛应用于电子产品的设计、生产、检验、维修等工作中的电压或电平测量。

1. 主要性能指标

- ① 电压测量范围 300μV~100V，分 12 挡。
- ② 电平测量范围 -70~40dB（0dB 1mV 600Ω）。
- ③ 频率范围 20Hz~1MHz。
- ④ 电压测量固有误差（以 1kHz 为基准） 300μV~3mV 各挡±5%；>3mV~100V 各挡±3%。
- ⑤ 电压测量工作误差（在基准频率时） 各挡±7%。
- ⑥ 输入阻抗 1kHz 时输入电阻约为 500kΩ；输入电容范围在 300μV~1V 各挡约为 45pF，3~100V 各挡约为 25pF。

2. 工作原理

AS2292 型交流电压表原理框图如图 3.18 所示，主要由衰减器、分压器、放大器、检波器、稳压电源和量程控制器等部分组成。

输入信号由 S<sub>1</sub> 切换“ A 输入”或“ B 输入”状态。R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub> 组成高阻衰减器。对于 1V 以上的输入信号经衰减后进入阻抗变换器。高阻衰减器对 1V 以下量程均不经衰减。

放大器 I 对 10mV 以下量程的输入信号进行放大；分压器 I 对 30mV 以上的输入信号进行衰减。

分压器 II 由 R<sub>3</sub>~R<sub>6</sub> 低阻值电阻组成，衰减量分别为 0dB、-10dB、-20dB、-30dB。将放大器 I、分压器 I、分压器 II 的三组信号组合起来使用，构成仪表的 12 挡量程。

仪表的量程由 2 刀 12 位波段开关控制。其中高阻衰减器由继电器 S<sub>4</sub> 变换，放大器 I 和分压器 I 由开关 S<sub>5</sub> 控制。在 10mV 以下各挡，分压器 I 断开；在 30mV 以上各挡，放大器 I 不工作，信号经过衰减后进入分压器 II，分压器 II 由四刀模拟开关（CH4066）变换。检波器为半桥式均值检波器。

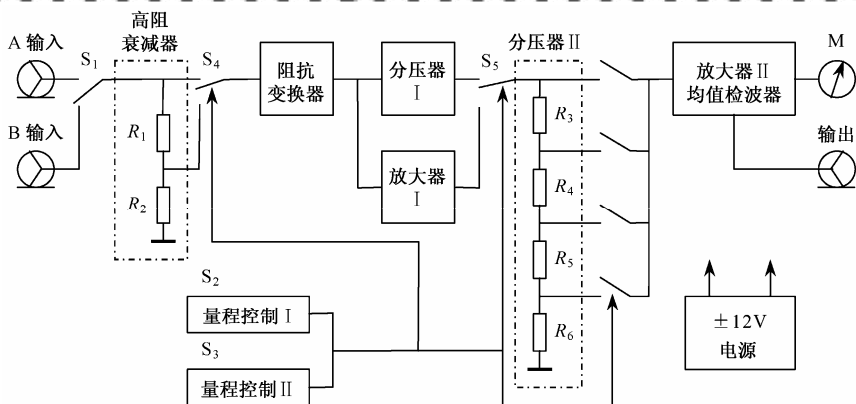


图 3.18 AS2292 型交流电压表原理框图

### 3.3.5 使用方法及注意事项

一般来说,在选用电压表时除了要选择量程、频率范围、误差和输入阻抗合适的电压表外,还应注意:

#### (1) 调零

测量电压之前应注意检查指针是否处在零位,否则,应进行机械调零或电气调零,必要时还要注意通电预热。

#### (2) 量程选择

除非所用电压表为非线性刻度的电压表或者被测信号是特殊信号,例如,均值电压表测量噪声电压时的指针要求指在满度值的 1/2 处;一般情况下,应尽量使指针处在量程满刻度值的 2/3 以上区域。如果事先不知道被测电压的大小,可以先从大量程开始,再逐步减小量程,直至量程合适为止。

#### (3) 拆接线顺序

由于电压表灵敏度较高,测量时应先接入与机壳相连的接地线,然后接入另一测试线。测量结束时,应按相反顺序取下连接线,否则外界或者内部的感应信号有可能使仪表指针偏转超过量程而损坏表头。测量时,接地点应可靠接地。

#### (4) 测量非正弦波电压

除了选择检波类型合适的电压表外,还应注意正确理解读数的含义并对读数进行修正,否则将产生波形误差,影响测量准确度。

#### (5) 测量音频电压

在测量数伏级以上的音频电压时,可以使用一般的导线作为测试线;而在测量毫伏级音频电压时,必须严格调零,并尽量选用短的带金属屏蔽线作为测试线。

#### (6) 测量电平值

电平即绝对电平,有功率电平  $P_w$  和电压电平  $P_u$  之分,通常以基准功率 (1mW) 或基准电压 (0.775V) 为零电平刻度,单位为 dB。

##### 1) 功率电平

功率电平的定义式为

$$P_w(\text{dB}_m) = 10 \lg(P_x / 1\text{mW})$$

式中,  $P_x$  为被测功率,单位为 mW。



当  $P_x=1\text{mW}$  时,  $P_w(\text{dB}_m)=0\text{dB}$ , 称为零功率电平; 当  $P_x>1\text{mW}$  时,  $P_w(\text{dB}_m)$  为正值; 当  $P_x<1\text{mW}$  时,  $P_w(\text{dB}_m)$  为负值。

## 2) 电压电平

### ① 电压电平的定义式为

$$P_u(\text{dB}_V)=10\lg(U_x/0.775\text{V})$$

式中,  $U_x$  为被测电压的有效值, 单位为 V。

当  $U_x=0.775\text{V}$  时,  $P_u(\text{dB}_V)=0\text{dB}$ , 称为零电压电平; 当  $U_x>0.775\text{V}$  时,  $P_u(\text{dB}_V)$  为正值; 当  $U_x<0.775\text{V}$  时,  $P_u(\text{dB}_V)$  为负值。

② 如果被测点的阻抗为  $600\Omega$ , 可将测试线直接并接于被测点两端, 被测点的实际电平为

$$P_u(\text{dB}_V)=P_{uL}(\text{dB}_V)+P_{uP}(\text{dB}_V)$$

式中,  $P_{uL}(\text{dB}_V)$  为仪表量程开关分贝指示值,  $P_{uP}(\text{dB}_V)$  为仪表表头分贝指示值。

③ 如果被测点阻抗不是  $600\Omega$ , 经推导可知, 被测点的实际电平为

$$P_u(\text{dB}_V)=P_{uL}(\text{dB}_V)+P_{uP}(\text{dB}_V)+10\lg\frac{600\Omega}{R(\Omega)}$$

例如, 当被测点阻抗为  $150\Omega$  时, 被测点的实际电平为

$$P_u(\text{dB}_V)=P_{uL}(\text{dB}_V)+P_{uP}(\text{dB}_V)+10\lg\frac{600\Omega}{150\Omega}$$

④ 如果被测点为开路, 则应在该端并接  $600\Omega$  或  $150\Omega$  的无感电阻, 实际电平值分别按以上两式计算。

测量电平时, 应注意零电平时的基准功率或基准电压, 所用基准不同, 换算得到的功率或电压值则不同。

### (7) 注意安全、防止触电

在测量  $36\text{V}$  以上电压时, 必须注意安全, 以防触电。

### (8) 校准

为保证仪表的测量准确度, 仪表使用一个时期后应借助标准电压表进行校准。

## 3.4 数字电压表

与模拟式电压表相比, 数字电压表 (DVM) 具有精度高、测速快、抗干扰能力强和便于实现电压测量智能化与自动化等优点, 应用比较广泛。但由于不能较直观地观测到交变电压的变化情况, 故不能完全替代模拟式电压表。在此, 我们仅讨论直流数字电压表。

### 3.4.1 主要性能指标

#### 1. 电压测量范围

##### (1) 量程

数字电压表一般有好几个量程, 量程的改变通常由步进衰减器与输入放大器的适当配合来实现。信号未经衰减器衰减和放大器放大的量程称为基本量程, 基本量程的测量误差最小。量程变换有手动变换和自动变换两种, 自动变换借助于内部逻辑控制电路来实现。



## (2) 显示位数

数字电压表中能显示 0~9 十个数码的数位称为满位, 否则, 称为半位或  $1/2$  位。例如, 最大显示数字为 9.999 的称为 4 位数字电压表; 最大显示数字为 19.999 的称为  $4\frac{1}{2}$  位数字电压表。最大显示数字为 39.999 的称为  $4\frac{3}{4}$  位数字电压表, 因为 39.999 的左边第一位可以显示的数字为 0~3 共 4 个数字, 但可以作为有效数字的只有 1、2、3 共 3 个数字, 而满位位数为 4, 故称之为  $4\frac{3}{4}$  位数字电压表。最大显示数字为 11.999 的也称为  $4\frac{1}{2}$  位数字电压表, 因为由于量程限制等原因, 虽然左边第二位在显示最大数字时只能显示为 1, 但在其他情况下也可以显示 0~9 这十个数字, 该位仍为满位, 而左边第一位则可以显示 0, 1 共 2 个数字, 故仍称之为  $4\frac{1}{2}$  位数字电压表。最大显示数字为 19.999、39.999、11.999 的数字电压表统称为 4 位半数字电压表。

## (3) 超量程能力

超量程能力是指数字电压表在一个量程上所能测量的最大电压超出量程值的能力, 是数字电压表的一个重要指标。数字电压表有无超量程能力, 要根据它的量程分挡情况以及能够显示的最大数字情况来决定, 计算式为

$$\text{超量程能力} = \frac{(\text{能测量出的最大电压} - \text{量程值})}{\text{量程值}} \times 100\%$$

例如, 最大显示数字分别为 9.999, 19.999, 5.999, 11.999, 对应量程分别为 10V, 20V, 5V, 10V 的数字电压表的超量程能力分别为 0%, 0%, 20%, 20%。

有了超量程能力, 在有些情况下可以提高测量精确度。例如, 被测电压为 10.001V, 若采用不具有超量程能力的 4 位 DVM10V 挡测量, 读数为 9.999V; 用 100V 挡测量, 读数为 10.00V, 这样就丢掉了 0.001V 的信息。若改用有超量程能力的四位半 DVM10V 挡测量, 均可读出 10.001V, 显然提高了精确度。

## 2. 分辨力

分辨力是指数字电压表能够反映出的被测电压最小变化值, 实际上就等于所选量程最右边数字的一个单位, 即末尾的“1”表示出的电压值。不同量程的分辨力不同, 最小量程的分辨力最高。通常以最小量程的分辨力作为数字电压表的分辨力。

例如, 4 位 DVM 在 1V, 10V 量程上的分辨力分别为 0.0001V, 0.001V, 则 DVM 的分辨力为 0.0001V。这是因为, 4 位 DVM 的最大显示数字为 9999, 量程为 1V 和 10V 时, 可以判断出满量程时的显示数字应分别为 0.9999 和 9.999, 根据定义即可判断出上述分辨力的大小。

## 3. 测量误差

数字电压表的测量误差通常以它的固有误差或工作误差来表示, 属于允许误差。数字电压表的固有误差一般采用以下两种表示方法。

$$\Delta U = \pm(\alpha\% U_x + \beta\% U_m)$$

或者

$$\Delta U = \pm\alpha\% U_x \pm n \text{ 字}$$





式中,  $U_x$  为被测电压读数;  $U_m$  为数字电压表量程满度值;  $\pm\alpha\%U_x$  称为读数误差, 随被测电压的变化而变化;  $\pm\alpha\%$ 、 $\pm\beta\%$  分别称为相对项系数和固定项系数;  $\pm\beta\%U_m=\pm n$  字, 称为满度误差。

读数误差主要包括由仪器各电路单元, 如衰减器、放大器、A/D 变换器、参考电源等引起的误差和不稳定性误差, 其中既有随机误差又有系统误差, 但一般按随机误差处理。

满度误差主要包括两部分: 一部分是由放大器、基准电压、积分器等零点漂移引起的不随被测电压变化的固定成分, 性质上属于系差; 另一部分是数字电压表的量化误差, 性质上也属于系差。为方便起见, 常把两部分误差组合起来表示满度误差。量化误差的有关内容参见 7.4.1 节。

量程确定后, 满度误差为固定值, 可用  $n$  字来表示,  $n$  等于满度误差与末尾数字 1 个单位电压 (即分辨力) 的比值。

**【例 3-3】**某 5 位 DVM 在 5V 量程测得电压为 2V, 已知 5V 量程的固有误差计算式为  $\Delta U=\pm(0.005\%U_x+0.004\%U_m)$ , 试求 DVM 的固有误差、读数误差和满度误差各是多少? 满度误差相当于几个字?

**解:** 因为 DVM 位数为 5, 且量程为 5V, 所以电压表末尾 1 个单位电压为 0.0001V。

读数误差为

$$\pm 0.005\%U_x=\pm 0.005\%\times 2V=\pm 0.0001V$$

满度误差为

$$\pm 0.004\%U_m=\pm 0.004\%\times 5V=\pm 0.0002V$$

满度误差相当于

$$\pm 0.0002V/0.0001V=\pm 2 \text{ 字}$$

固有误差为

$$\pm (0.0001V+0.0002V)=\pm 0.0003V$$

答: (略)

#### 4. 输入电阻和输入零电流

数字电压表的输入电阻一般不小于  $10M\Omega$ , 直流数字电压表的可达  $1G\Omega$ 。为了提高数字电压表的输入阻抗而用场效应管等有源器件构成电压表的输入电路, 故当电压表输入端短路时, 测试线上会有电流通过, 该电流称为输入零电流或输入偏置电流。测量电压时该电流是始终存在的, 应尽量减小输入零电流。

#### 5. 抗干扰能力

数字电压表的抗干扰能力较强, 通常用串模干扰抑制比和共模干扰抑制比来表示, 干扰抑制比的数值越大, 表明数字电压表抗干扰的能力越强。

##### (1) 串模干扰

串模干扰又称为常模干扰或常态干扰, 是指以串联方式与被测信号一起作用于仪表输入端的干扰信号, 如图 3.19 (a) 所示。图中,  $u_x$ 、 $u_{sm1}$  为被测电压和其中混有的串模干扰信号,  $u_{sm2}$  为引线感应产生的干扰信号, H、L 为 DVM 的高、低输入端。

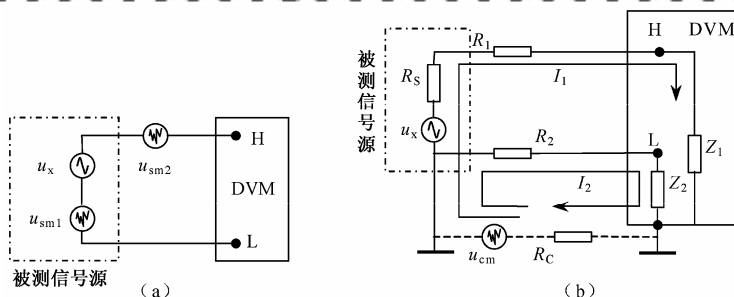


图 3.19 串模干扰和共模干扰示意图

串模干扰抑制比一般是针对工频干扰而言的, 计算如下:

$$\text{SMRR(dB)} = 20 \lg \frac{\text{串模干扰电压峰值 } U_{\text{sm}}}{\text{串模干扰产生的最大误差 } \Delta U_{\text{sm}}} \quad (\text{dB})$$

## (2) 共模干扰

当被测对象与 DVM 相距较远等情况下, 由于被测信号源地线与 DVM 地线之间存在电位差而产生共模干扰, 该干扰信号对 DVM 的高、低输入端都产生影响, 这种干扰可能是直流, 也可能是工频或高频交流。

图 3.19 (b) 所示为共模干扰示意图。图中,  $Z_1$ 、 $Z_2$  为 DVM 两个输入端与机壳间绝缘电阻, 一般  $Z_1 \square Z_2$ 。  $R_1$ 、 $R_2$  为输入信号线电阻。共模干扰电压  $u_{\text{cm}}$  将产生电流  $I_1$  和  $I_2$  分别串入  $R_1$ 、 $R_2$  两个支路, 形成两个串模干扰电压  $I_1(R_1+R_s)$  和  $I_2 R_2$  对测量产生影响。

共模干扰抑制比计算如下:

$$\text{CMRR(dB)} = 20 \lg \frac{\text{共模干扰电压峰值 } U_{\text{cm}}}{\text{共模干扰产生的最大误差 } \Delta U_{\text{cm}}} \quad (\text{dB})$$

## 6. 测量速度

测量速度是指在单位时间内, 以规定的准确度完成的最大测量次数, 或完成单次测量所用的时间。数字电压表的测量速度主要取决于 A/D 变换器的类型, 不同类型 DVM 的测量速度差别很大, 测速较快的是比较式 DVM, 测速较慢的是积分式 DVM。测量速度是描述数字电压表的一项重要性能指标, 而不是模拟式电压表的性能指标。

另外, 数字电压表通常具有自动调零、自动切换量程和显示极性自动功能。

### 3.4.2 A/D变换器

数字电压表的核心是 A/D 变换器, 应用比较广泛的是双积分式 A/D 变换器以及逐次比较式 A/D 变换器。

#### 1. 双积分式A/D变换器

双积分式 A/D 变换器即双斜式 A/D 变换器, 属于 V-T 型积分式 A/D 变换器。它将直流电压与基准电压的比较通过两次积分变换成为两个时间段的比较, 并由此将模拟电压变换为与其输入电压的平均值 (即输入直流电压) 成正比的时间段, 时间段的长短则由计数器来测定, 计数器所得的计数值即 A/D 变换的结果。

##### (1) 工作原理

双积分式 A/D 变换器的工作过程分为准备、取样和比较三个阶段, 原理框图如图 3.20



所示, 输入为负电压时的工作波形如图 3.21 所示, 图中  $u_i(t)$ ,  $u_o(t)$  和  $p(t)$  分别为积分器的输入信号、输出信号和计数脉冲,  $(t_0 \sim t_1)$ ,  $(t_1 \sim t_2)$ ,  $(t_2 \sim t_3)$  分别为准备、取样、比较时间, 虚线为输入  $U'_x$  时的波形, 输入为正电压时的工作波形与图示波形方向相反。

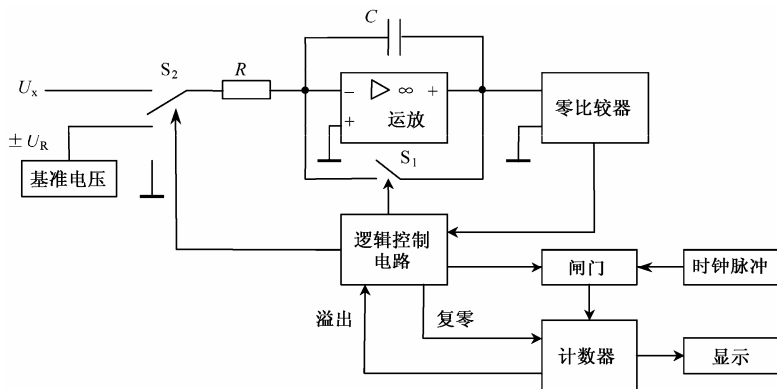


图 3.20 双积分式 A/D 变换器原理框图

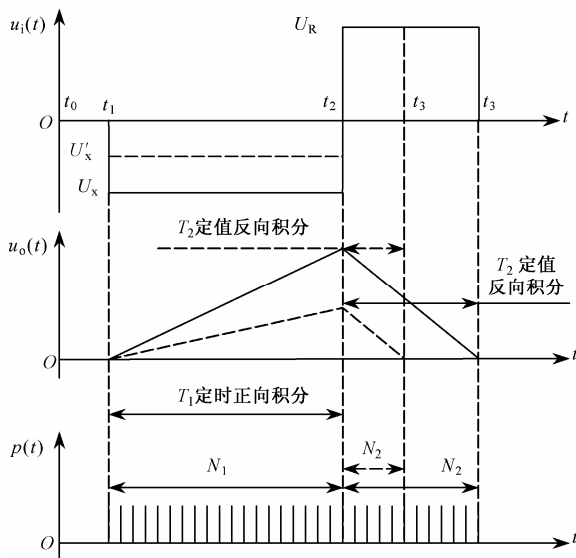


图 3.21 双积分式 A/D 变换器工作波形

- ① 准备阶段,  $S_1$  闭合、 $S_2$  接地, 使积分电容  $C$  完全放电, 为取样作准备。
  - ② 取样阶段,  $S_1$  断开、 $S_2$  将积分器的输入端接输入电压  $U_x$ , 积分器对  $U_x$  定时积分 (设正向充电), 当计数器计数为  $N_1$  (常数), 即  $t_2$  时刻, 定时取样完毕。
  - ③ 比较阶段,  $S_1$  仍断开、 $S_2$  和与  $U_x$  极性相反的基准电压  $U_R$  ( $U_R$  为恒定值, 电路中一般设置有输入电压极性检测电路) 处, 积分器对  $U_R$  反向积分 (即反向放电)。当积分器输出电压下降为零, 即  $t_3$  时刻, 逻辑控制电路控制计数器停止计数, 本次 A/D 变换结束。
- 显然, 电容  $t_2$  时刻充上的电荷与  $t_3$  时刻放去的电荷相等, 即  $t_2$ 、 $t_3$  时刻积分器输出电压的大小相等。经推导得:

$$T_2 = \frac{T_1}{U_R} \bar{U}_x$$



$$N_2 = \frac{N_1}{U_R} \bar{U}_x \quad (3-3)$$

$$\bar{U}_x = \frac{U_R}{N_1} N_2 \quad (3-4)$$

式中,  $\bar{U}_x$  为  $U_x$  在时间  $T_1$  内的平均值;  $T_1=t_2-t_1$ , 为定时取样时间;  $T_2=t_3-t_2$ , 为定值比较时间;  $U_R/N_1$  称为 A/D 变换器的变换灵敏度, 通常设置为  $1 \times 10^{-n} \text{V}$  ( $n$  为自然数), 即数字电压表的分辨力;  $N_2$  为取样阶段所计脉冲数, 与输入电压大小有关。

可见, 双积分式 A/D 变换器的取样阶段为定时不定值正向积分, 比较阶段为定值 (基准电压) 不定值反向积分。

## (2) 性能特点

双积分式 A/D 变换器具有稳定性好, 准确度高, 抗干扰能力强等优点。这是因为取样和比较时使用的是同一积分器和时钟, 因此,  $R$ 、 $C$  参数值的缓慢变化以及运算放大器、时钟等性能的不稳定都不会影响变换准确度。由式 (3-3) 可看出, 变换结果只反映模拟输入的平均值, 所以, 只要采样时间  $T_1$  为干扰信号 (特指工频干扰) 周期的整数倍, 则干扰信号产生的平均值为零, A/D 变换器抗干扰能力得以提高。因为双积分式 A/D 变换器的输出只响应于输入信号的平均值, 所以计算式中用  $\bar{U}_x$  而不用  $U_x$ 。

由于双积分式 A/D 变换器具有上述突出的优点, 双积分式数字电压表应用比较普遍, 如国产 PZ-12、DS-14、DS-26、DS-18A 型等。

由式 (3-4) 可看出, 无论要增强变换器的抗干扰能力, 还是要提高数字电压表的分辨力, 都要延长取样时间, 这样就使得双积分式 A/D 变换器的变换速度不可能提高上去, 它的变换速度一般低于 20 次/秒。为了提高 A/D 变换器的变换速度, 对双积分式 A/D 变换器进行改进而出现了三次积分式 A/D 变换器。

## 2. 三次积分式 A/D 变换器

三次积分式 A/D 变换器又称为三斜式 A/D 变换器, 它将双积分式 A/D 变换器的第二次积分 (定值反向积分) 分成两次进行, 目的是加快变换速度、减小变换误差。

### (1) 工作原理

三次积分式 A/D 变换器的工作过程分为准备、取样、粗积分和精积分四个阶段, 在此主要介绍后三个阶段的工作过程。原理框图和积分器输出波形如图 3.22 及图 3.23 所示。

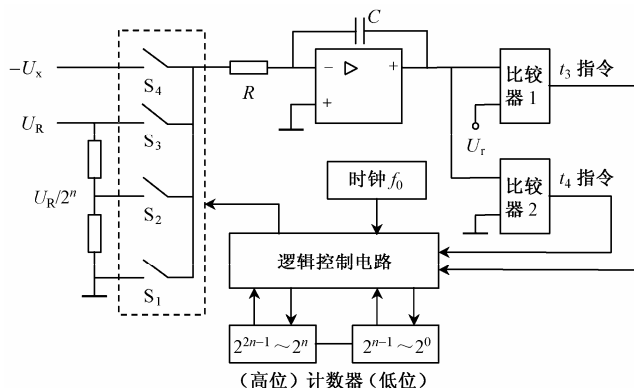


图 3.22 三次积分式 A/D 变换器原理图

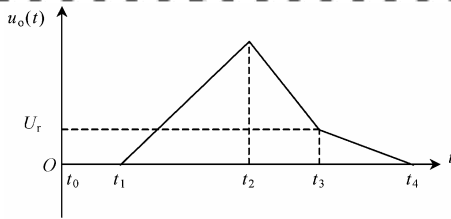


图 3.23 三次积分式 A/D 变换器积分器输出波形

① 取样阶段 ( $t_1 \sim t_2$ ) 图 3.22 中计数器共有  $2^n$  位 (二进制)。  $t_1$  时刻, 逻辑控制电路控制  $S_4$  闭合,  $S_1, S_2, S_3$  断开,  $-U_x$  被接入积分器, 开始取样 (第一次积分), 即  $-U_x$  对积分电容  $C$  充电。取样时间由计数器低位部分溢出脉冲控制。

$t_2$  时刻积分器输出电压为

$$u_o(t_2) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} (-U_x) dt = \frac{t_2 - t_1}{RC} \bar{U}_x = \frac{T_1}{RC} \bar{U}_x$$

$$T_1 = t_2 - t_1 = 2^n / f_0 = N_1 / f_0$$

$$N_1 = 2^n$$

式中,  $T_1$  为取样时间,  $f_0$  为计数脉冲频率,  $N_1$  为与  $T_1$  对应的计数脉冲个数。

② 粗积分阶段 ( $t_2 \sim t_3$ )  $t_2$  时刻, 逻辑控制电路控制  $S_3$  闭合,  $S_1, S_2, S_4$  断开, 基准电压  $U_R$  接入积分器, 开始粗积分 (第二次积分), 即  $U_R$  对积分电容放电, 积分器输出向反方向变化, 当反方向积分至基准电压  $U_r$  时, 比较器 1 动作, 产生标志  $t_3$  时刻的指令。在对  $U_R$  进行积分期间仅计数器高位部分 ( $2^{2n-1} \sim 2^n$ ) 工作, 至  $t_3$  时止。

$t_3$  时刻积分器输出端减小的电压为

$$u'_o(t_3) = -\frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_3} (U_R) dt = -\frac{T_2}{RC} U_R$$

$$T_2 = t_3 - t_2 = N_2 / f_0$$

式中,  $u'_o(t_3)$  为  $t_3$  时刻积分器输出端减小的电压,  $T_2$  为粗积分时间,  $N_2$  为与  $T_2$  对应的计数脉冲个数。

③ 精积分阶段 ( $t_3 \sim t_4$ ) 根据  $t_3$  时刻的指令, 逻辑控制电路闭合  $S_2$ , 断开  $S_1, S_3, S_4$ , 将  $U_R / 2^n$  接入积分器, 开始精积分 (第三次积分), 直至积分输出电压为 0, 比较器 2 动作, 产生标志  $t_4$  时刻的指令, 至此一个变换周期结束。在  $t_3 \sim t_4$  期间, 计数器低位部分工作, 进行精确计数, 如果计数器超出  $2^n$  (即低位部分溢出), 溢出脉冲进位到计数器高位部分。

$t_4$  时刻积分器输出端减小的电压为

$$u''_o(t_4) = -\frac{1}{RC} \int_{t_3}^{t_4} (U_R / 2^n) dt = -\frac{T_3}{RC} \cdot \frac{U_R}{2^n}$$

$$T_3 = t_4 - t_3 = N_3 / f_0$$

式中,  $u''_o(t_4)$  为  $t_4$  时刻积分器输出端减小的电压,  $T_3$  为精积分时间,  $N_3$  为与  $T_3$  对应的计数脉冲个数。

在三次积分期间, 积分器的输出从零开始最后回到零, 故积分电容净得电荷为零。经推导得:

$$\bar{U}_x = \frac{U_R}{N_1} (N_2 + \frac{1}{2^n} N_3) = \frac{U_R}{2^n N_1} (2^n N_2 + N_3) = \frac{U_R}{2^n N_1} N$$



$$N=2^n N_2 + N_3$$

(3-5)

式中,  $N$  为粗积分和精积分阶段计数器所计脉冲的对应值, 它与输入电压的平均值成正比。

### (2) 性能特点

经推导如果不考虑准备时间,  $m$  位 (二进制) 双积分式 A/D 变换器在满量程时, 取样、比较阶段所需脉冲个数均为  $2^m$ , 即共需要  $2^{m+1}$  个脉冲数。而  $m$  位三次积分式 A/D 变换器每次积分所需脉冲个数为  $2^{m/2}$ , 即共需要  $3 \times 2^{m/2}$  个脉冲。所以相同位数的双积分式 A/D 变换器和三次积分式 A/D 变换器所需脉冲个数之比为  $2^{\frac{m}{2}+1}/3$ 。

例如, 时钟频率为 10MHz 的 14 位 (二进制) 分辨力的双积分式 A/D 变换器的变换速度约为 300 次/秒 ( $10 \times 10^6 / 2^{14+1}$ )。而 14 位三次积分式 A/D 变换器计满的脉冲数共为  $3 \times 2^{m/2} = 3 \times 2^7$ , 其变换速度可达 26000 次/秒 ( $10 \times 10^6 / 3 \times 2^7$ ), 故比双积分式的速度提高约 85 倍。

三次积分式 A/D 变换器常被用于智能数字电压表中, 例如 HP3455 型、HP3458A 型数字电压表等。

另外, 由于精积分时的基准电压仅为  $U_R/2^n$ , 而使积分器输出以很慢的速度越过零点, 故可以提高变换精度。

## 3. 逐次比较式 A/D 变换器

逐次比较式数字电压表又称为反馈编码式数字电压表, 其核心是逐次比较式 A/D 变换器。逐次比较式 A/D 变换器的工作原理类似于天平称量物体质量, 按照“大者弃、小者留”的原则, 将被测电压与可变基准电压逐次进行比较, 直至逼近被测电压值。

### (1) 工作原理

逐次比较式 A/D 变换器的原理框图如图 3.24 所示。

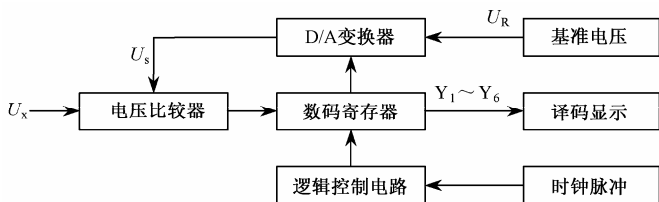


图 3.24 逐次比较式 A/D 变换器原理框图

数码寄存器 (SAR, Successive Approximation Register) 在时钟脉冲的作用下逐次提供从高位到低位代表不同电压 (即跳步电压) 的二进制基准码。例如, 设 DVM 基本量程满度值为 10V (即  $U_R=10V$ ), 且 A/D 变换器的位数为 6 位 (二进制), 则从高位到低位每个二进制基准码的跳步电压值分别为 5V ( $10 \times 2^{-1}$ )、2.5V ( $10 \times 2^{-2}$ )、1.25V ( $10 \times 2^{-3}$ )、0.625V ( $10 \times 2^{-4}$ )、0.3125V ( $10 \times 2^{-5}$ )、0.15625V ( $10 \times 2^{-6}$ )。

D/A 变换器的作用是将输入的数字量变换为模拟电压输出, 模拟输出电压  $U_S$  等于数码寄存器提供的各数字量与跳步电压乘积之和。

设  $U_R=10.000V$ ,  $U_x=5.625V$ , 逐次比较式 A/D 变换器工作过程如下:

① 在起始脉冲作用下, SAR 清零;

② 第一个脉冲到来时, SAR 最高位  $2^{-1}$  先置为 1, 数码寄存器输出为  $(100\ 000)_2$ ,  $U_S=1 \times 5.000V=5.000V < U_x$ , 比较器输出为 1, 得  $Y_1=1$ , SAR 最高位  $2^{-1}$  保留为 1, 即“小者留”。

③ 第二个脉冲到来时, SAR 的次高位  $2^{-2}$  先置为 1, SAR 输出为  $(110\ 000)_2$ ,  $U_S=5.000V+1$



$\times 2.500\text{V} = 7.5\text{V} > U_x$ , 比较器输出为 0, 得  $Y_2=0$ , SAR 次高位  $2^{-2}$  返回为 0, 即“大者弃”。

④ 第三个脉冲到来时, SAR 的  $2^{-3}$  位先置为 1, SAR 输出为  $(101\ 000)_2$ ,  $U_S=5.000\text{V}+0.000\text{V}+1\times 1.250\text{V}=6.250\text{V} > U_x$ , 比较器输出为 0, 得  $Y_3=0$ , SAR 的  $2^{-3}$  位返回为 0。

⑤ 第四个脉冲到来时, SAR 的  $2^{-4}$  位先置为 1, SAR 输出为  $(100\ 100)_2$ ,  $U_S=5.000\text{V}+0.000\text{V}+0.000\text{V}+1\times 0.625\text{V}=5.625\text{V}=U_x$ , 比较器输出为 1, 得  $Y_4=1$ 。此时, 电路处于平衡状态, SAR 停止计数, A/D 变换器停止工作。SAR 输出的二进制代码为  $(100\ 100)_2$ , 经过译码显示电路, 得到 5.625V 的显示。否则, 电路继续逐次比较, 直至最末位为止。

## (2) 性能特点

① 优点为变换速度快、精度高 这是因为跳步电压是按照  $2^{-n}U_R$  递减设置的, 没有双积分式 A/D 变换器中电压的积分过程, 且只要二进制数码位数足够多, 其精度亦很高。

② 缺点为抗干扰能力差 这是因为电压比较器的输入是被测电压瞬时值, 所以外界任何干扰电压的串入都可以影响测量结果, 通常在输入端设置低通滤波器来抑制串模工频干扰。

常见逐次比较式 A/D 变换器集成电路有: 8 位的 0801, 0804, 0808, 0809, 10 位的 7570, 575, 579; 12 位的 574、578、5782 等。

综上所述, 可见双积分式、三次积分式、逐次比较式 A/D 变换器的输入电压均应为直流电压而非交流电压。对于交流数字电压表, 在进行 A/D 变换前均应对被测电压进行 AC/DC 变换, 并进行衰减或放大使之在 A/D 变换器允许的输入范围内。

## 3.4.3 直流数字电压表实例

DS-26A 型直流数字电压表为双积分式数字电压表, 利用双积分式 A/D 变换器将被测电压变换为数字量。它具有五位数码显示、极性符号显示、单位显示以及极性自动变换、打印输出等功能。

### 1. 性能指标

(1) 测量范围  $\pm 10\mu\text{V} \sim \pm 1000\text{V}$  直流电压, 分五挡。

(2) 分辨力 (灵敏度) 最高灵敏度为  $10\mu\text{V}$ 。

(3) 固有误差 800mV、80V 量程:  $\pm 0.01\%$  读数  $\pm 0.005\%$  满度;

8V 量程 (基本量程):  $\pm 0.005\%$  读数  $\pm 0.003\%$  满度;

800V 量程:  $\pm 0.007\%$  读数  $\pm 0.03\%$  满度;

1000V 量程:  $\pm 0.01\%$  读数  $\pm 0.01\%$  满度。

(4) 输入阻抗 (通电时) 800mV、8V 量程  $> 1000\text{M}\Omega$ ; 其他量程约等于  $10\text{M}\Omega$ 。

(5) 测量速度 取样时间分为 100ms 和 20ms 两挡; 连续取样测量速度为: 100ms 挡满度测量约 6 次/秒; 20ms 挡满度测量约 25 次/秒。

### 2. DS-26A型直流数字电压表的工作原理

DS-26A 型直流数字电压表原理框图如图 3.25 所示, 主要由输入电路、双积分式 A/D 变换器、显示电路、电子开关等部分组成。

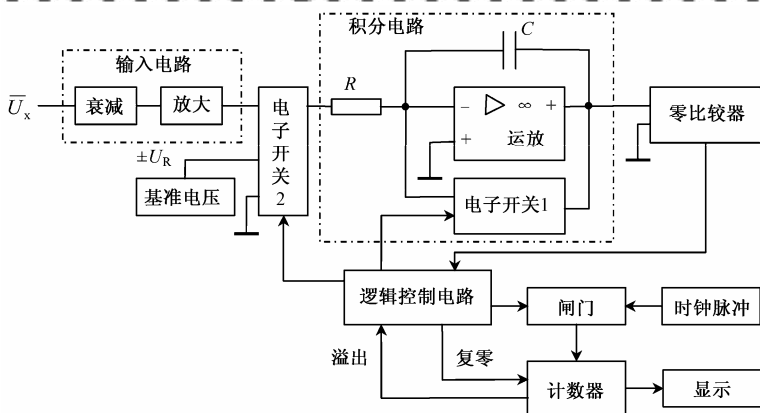


图 3.25 DS-26A 型直流数字电压表原理框图

输入电路的主要作用是将  $0 \sim \pm 1000\text{V}$  直流电压规范化为  $0 \sim \pm 8\text{V}$  的直流电压, 经电子开关送入双积分式 A/D 变换器。

DS-26A 型直流数字电压表的工作原理与图 3.21 相似。当一次测量结束后, 逻辑控制电路送出一个复位脉冲, 一方面作为清零复位指令, 另一方面使闸门处于待开启状态。

逻辑控制电路输出的启动脉冲控制闸门打开, 计数器开始计数, 经历  $T_1$  时间。同时启动脉冲使输入模拟电子开关打开, 仪器处于取样阶段。当计数器计数记满  $N_1$  时, 取样结束, 逻辑控制电路发出一个控制信号, 控制信号一方面使输入模拟电子开关断开, 同时打开相应的基准电压源的控制开关; 另一方面, 使闸门关闭, 计数器清零, 然后重新打开闸门, 开始  $T_2$  时间的比较。当比较结束时, 零比较器的输出脉冲 (关门脉冲) 经逻辑控制电路关闭闸门和基准电压源开关, 比较时间结束。此关门脉冲作为十进制变换脉冲, 启动显示电路和打印输出电路工作。



## 本章小结

本章介绍电子电压表, 它是电子测量仪器中使用最广泛的、也是最为重要的仪器之一。

(1) 电子电压表分为模拟式和数字式电压表两大类。

(2) 交流电压表的结构类型有检波—放大式、放大—检波式和外差式等多种, 性能最好的是外差式电压表, 频宽范围大的是检波—放大式。

(3) 测量交流电压时, 一般利用检波器将交流电压变换为直流电压。检波器分为均值、峰值、有效值检波器三种, 模拟式交流电压表则分为均值、峰值、有效值电压表三种。均值电压表的结构为放大—检波式, 属于高频毫伏表。峰值电压表的结构一般为检波—放大式, 但也可构成放大—检波式, 属于超高频毫伏表。

(4) A/D 变换器分为积分式、比较式和复合式等类型, 常用的是双积分式和逐次比较式 A/D 变换器。

(5) 双积分式 A/D 变换器由积分器、电子开关、比较器、逻辑控制电路等组成, 分为准备、定时取样、定值比较三个工作过程, 取样与比较是方向相反的两次积分。它的工作速度较低, 但抗干扰能力强, 测量准确度高、价格低廉。

(6) 三次积分式 A/D 变换器是双积分式 A/D 变换器的改进型, 与双积分式 A/D 变换器的区别之处是改变双积分式 A/D 变换器的第二次积分 (比较) 为粗积分和精积分两次积分。它除了具有双积分式 A/D 变换器的优点外, 变换速度更快。





(7) 逐次比较式 A/D 变换器主要由数码寄存器、D/A 变换器等组成，它根据“大者弃、小者留”的原则，将模拟量变换为数字量。其变换精度高，速度快，但抗干扰能力差。

(8) 数字电压表分为双积分式、比较式和复合式 DVM。交流数字电压表也必须先将交流输入变换为直流电压后进行测量。



### 习题 3

1. 模拟式交流电压表分为哪几种？分别属于什么结构类型？各有什么特点？
2. 计算图 3.26 所示电压波形的平均值、正峰值、负峰值、峰-峰值、有效值。

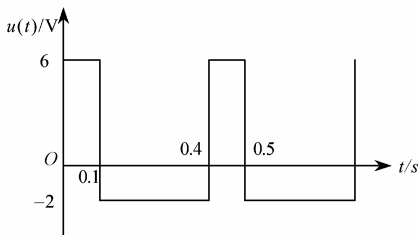


图 3.26 电压波形图

3. 已知正弦波、三角波和方波的峰值均为 10V，当分别采用均值、峰值、有效值电压表测量时，请问各电压表测量三种波形时的读数分别是多少？
4. 用峰值（或均值）电压表测量正弦波、方波、三角波时的读数均为 10V，试计算三种波形的有效值、峰值、平均值。
5. 可以用峰值电压表测量噪声电压和脉冲电压吗？如果不能，原因是什么？
6. 用一块  $4\frac{1}{2}$  位 DVM 的 10V 量程测量 8V 电压。已知该电压表的固有误差  $\Delta U = \pm (0.025\% \text{ 读数} + 0.01\% \text{ 满度})$ ，试求由于固有误差产生的测量误差是多少？它的满度误差相当于几个字？
7. 已知数字电压表的固有误差  $\Delta U = \pm (0.005\% \text{ 读数} + 0.002\% \text{ 满度})$ ，求在 5V 量程测量 4V 时产生的绝对误差和相对误差各是多少？
8. 下列四种数字电压表的最大显示数字分别为 9999、19999、3199 和 1999，问它们各是几位表？试求第二块表在 0.2V 量程上的分辨力是多大？
9. 双积分式 A/D 变换器的工作过程是怎样的？有什么特点？为什么？
10. 三次积分式 A/D 变换器的结构是怎样的？有什么特点？工作过程又是怎样的？
11. 逐次比较式 A/D 变换器的工作过程是怎样的？有什么特点？

# 第4章 波形测试与仪器



**学习参考：**示波器主要用来观测信号波形，测量电压、频率、时间等参数，是电子测量三大仪器之一。本章主要介绍波形测试原理及示波器的组成原理与应用。要求通过本章学习了解示波器的组成，理解它的工作原理，掌握它的应用方法。

**本章要点：**示波管组成及波形显示原理，示波器扫描过程、组成、性能指标及应用。

## 4.1 概述

电子示波器简称为示波器，它借助阴极射线示波管（CRT，Cathode Ray Tube）电子射线的偏转将电信号转换成可见图像，实现波形的显示，用于对电压、周期、频率、时间、相位、调制系数等参数的测量。示波器也是构成特性曲线测试等仪器的重要组成部分，例如晶体管特性图示仪、扫频仪等。

示波器按其性能、结构分为通用示波器、多束示波器、取样示波器、记忆存储示波器、专用示波器等，具体内容如下。

### （1）通用示波器

通用示波器是采用单束示波管（即单线示波管）的单束示波器（即单线示波器），它分为单踪、双踪、多踪示波器。单踪示波器在荧光屏上只能显示一个信号的波形，双踪示波器在荧光屏上可显示两个信号的波形，多踪示波器在荧光屏上可同时显示两个以上信号的波形。

### （2）多束示波器

多束示波器又称为多线示波器，它采用多束示波管（多线示波管），荧光屏上显示的每个波形都由单独的电子束扫描产生，能同时观测、比较两个以上的波形。

### （3）取样示波器

取样示波器将高频、超高频信号经取样变换为较低频率信号后再显示，适用于测量高频、超高频信号。

### （4）记忆存储示波器

记忆存储示波器具有记忆存储被测信号的功能，适用于异地观测、异地分析测量。

### （5）专用示波器

专用示波器能够满足特殊的用途，如监测调试电视系统的电视示波器，用于调试彩色电视中有关色度信号幅度和相位的矢量示波器和用于观测调试计算机和数字系统的逻辑示波器等。

本章着重讨论通用示波器的工作原理及其应用。



## 4.2 波形测试的基本原理

### 4.2.1 阴极射线示波管

阴极射线示波管 CRT 是示波器的重要组成部分, 用来将电信号变换为光信号而加以显示。CRT 主要由电子枪、偏转系统和荧光屏三大部分组成, 它们都被封装在真空的密闭玻璃壳内, 如图 4.1 所示。

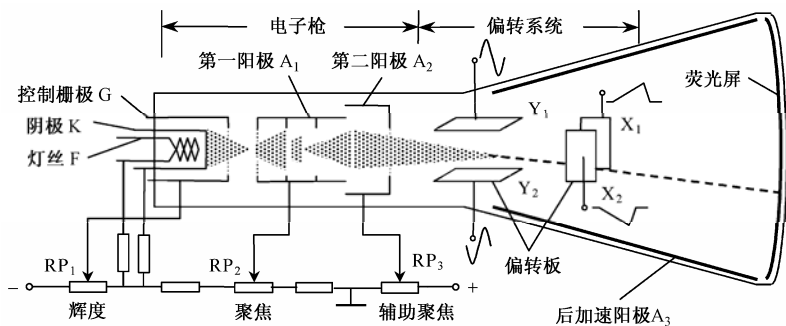


图 4.1 阴极射线示波管结构示意图

#### 1. 电子枪

电子枪用来发射电子并形成很细的高速电子束。它主要由灯丝 F、阴极 K、控制栅极 G、第一阳极  $A_1$ 、第二阳极  $A_2$  和后加速阳极  $A_3$  组成。

阴极是一个表面涂有金属氧化物的金属圆筒, 在灯丝的加热下, 阴极散射出大量游离电子。

控制栅极是顶端有孔的圆筒, 套装在阴极外面, 其电位比阴极电位低, 用于控制射向荧光屏的电子数量, 改变电子束打在荧光屏上亮点的亮度。调节电位器  $RP_1$  可以调节亮度, 称之为“辉度 (INTENSITY)”调节旋钮。与控制栅极极性相反的电压加到阴极上时, 也可起到与控制栅极相同的作用。

第一、二阳极是中间开孔、内有许多栅格的金属圆筒, 它们与控制栅极配合完成对电子束的加速和聚焦, 聚焦就是使电子束在荧光屏上的亮点直径变小。调节电位器  $RP_2$  和  $RP_3$  可使荧光屏亮点鲜明, 得到最佳的聚焦效果,  $RP_2$  和  $RP_3$  分别称之为“聚焦 (FOCUS)”调节和“辅助聚焦 (AUX FOCUS)”调节旋钮。

后加速阳极用来加速电子束, 提高示波管的偏转灵敏度。

#### 2. 偏转系统

偏转系统的作用是: 扫描电压、被测信号加到 X、Y 偏转板上时, 各自在 X、Y 偏转板间形成偏转电场, 分别使电子束产生在 X、Y 方向上的位移, 由此确定出亮点在荧光屏上的位置。

偏转系统位于第二阳极之后, 由两对相互垂直的 X (水平)、Y (垂直) 偏转板组成, 分别控制电子束水平方向和垂直方向的位移, 偏转的距离分别与加在偏转板上的电压大小成正比, 该特性称为阴极射线示波管的线性偏转特性。



为了显示出被测信号的波形,扫描电压和被测信号电压分别加在示波管 X、Y 偏转板上。扫描电压是与时间成正比的锯齿波,因此电子束在水平方向上的偏转距离与时间成正比,这是示波器测量时间、周期等参数的原理依据。改变扫描电压的大小,可以调整显示波形的宽度。锯齿波和被测信号都变换成极性相反的对称信号后加到偏转板上,如图 4.1 所示。被测信号变换后加在 Y 偏转板上,使电子束产生与信号电压成正比的偏移,这是示波器测量电压等参数的原理依据。改变 Y 偏转板上的信号电压大小,可以调整显示波形的幅度。

当在  $Y_1$  和  $Y_2$  偏转板上再叠加上对称的正、负直流电压时,显示波形会整体向上移位,反之,向下移位,调节该直流电压的旋钮称为“垂直移位(VERTICAL)”旋钮。当在  $X_1$  和  $X_2$  偏转板上再叠加上对称的正、负直流电压时,显示波形会整体向左移位,反之,向右移位,调节该直流电压的旋钮称为“水平移位 (HORIZONTAL)”旋钮。

### 3. 荧光屏

荧光屏内壁涂有荧光物质(磷光质),外壁则是玻璃管壳。当荧光物质受到电子枪发射的高速电子束轰击时能发出荧光,并维持一定的时间,该现象称为荧光物质的余辉现象。按照余辉现象维持时间(即余辉时间)的长短,荧光物质分为短余辉( $10\mu\text{s}\sim 1\text{ms}$ )、中余辉( $1\text{ms}\sim 0.1\text{s}$ )和长余辉( $0.1\sim 1\text{s}$ )等几种。被测信号频率越低,越宜选用余辉长的荧光物质,反之,宜选用余辉短的荧光物质。荧光物质发出的颜色有黄色、绿色、蓝色等几种,普通示波管常选用黄色或绿色的荧光物质。

为了进行定量测试,一般在荧光屏内壁预先沉积一个透明刻度,称为内刻度;或在屏外安置标有刻度的透明塑料板,称为外刻度。刻度区域通常为一矩形,称为测量窗或显示窗,其宽 $\times$ 高尺寸一般为  $10\text{DIV}\times 8\text{DIV}$ ,一般  $1\text{DIV}$  (Division, 格) $=1\text{cm}$ 。

## 4.2.2 波形显示原理

### 1. 波形显示

当示波管未加偏转电压时,电子束打在荧光屏中心位置上而产生亮点。当在示波管 X 和 Y 偏转板上都只加直流电压时,也可以在荧光屏上得到一个位置产生变化的亮点。每个亮点所在的位置都可以设为起始点。

被测信号的波形可以看做是由很多亮点构成的,由示波管的线性偏转特性可知,每个亮点在 X 和 Y 方向上的坐标(即相对于起始点的距离)分别与被测信号波形中该点的时间及瞬时电压成正比。当被测电压、扫描电压分别加至垂直、水平偏转板上时,电子束受到垂直、水平偏转板的共同作用,使电子束每一时刻产生的亮点的垂直位移与被测电压的瞬时电压成正比,而在时间上则一一对应,这样就在荧光屏上得到一个留存时间很短的亮点轨迹,即波形。只要被测信号是周期性信号,每次得到的波形又能完全重复,并且每次重复的间隔时间又很短,就可以得到稳定的被测信号波形。要求同一个亮点熄灭的时间应少于人眼视觉暂留时间,否则,波形会闪烁,不便于观测。

### 2. 扫描及同步

图 4.2 为扫描电压实际波形。

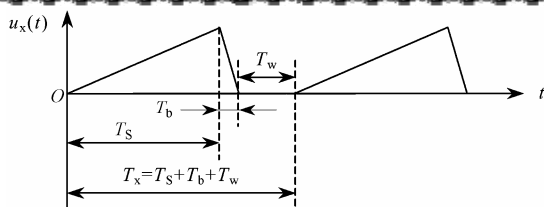


图 4.2 扫描电压实际波形

$T_s$  为扫描正程时间, 在此期间电子束产生自左至右的移动, 称为“扫描正程”;  $T_b$  为扫描逆程时间, 在此期间电子束产生自右至左的移动, 称为“扫描逆程”或“扫描回程”, 以保证下次扫描从起始点开始向右扫描;  $T_w$  为扫描休止时间, 以保证下次扫描在荧光屏上的起始点能够与本次扫描的起始点重合, 为便于分析通常不予考虑。当扫描逆程时间和扫描休止时间均为零时, 扫描电压为理想扫描电压。

扫描正程时显示被测信号的波形, 要求在此期间增强波形的亮度, 即增辉, 可以在控制栅极上叠加正极性脉冲或在阴极上叠加负极性脉冲来实现增辉。在扫描逆程时, 电子束在向左移动的过程中会出现亮线, 该亮线称为回扫线。假如在 Y 偏转板上加正弦电压, 在扫描休止时, 电子束会在起始点位置出现一条垂直的亮线, 该亮线称为休止线。

如果不对回扫线和休止线进行消隐, 而且扫描逆程电压为实际的非线性电压时, 在荧光屏上显示的图形如图 4.3 所示, 所以应对回扫线和休止线进行消隐。可以在控制栅极上叠加负极性脉冲或在阴极上叠加正极性脉冲来实现消隐。

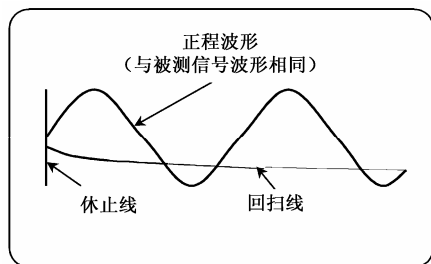


图 4.3 不消隐时显示的图形

如果要得到稳定的周期性被测信号波形必须满足同步条件:

$$T_x = T_s + T_b + T_w = nT_y \quad (n \text{ 为正整数}) \quad (4-1)$$

式中,  $T_x$  为扫描电压周期,  $T_y$  为被测信号周期。

由此可见, 被测信号和扫描电压对电子束的作用时间总是相等的。所以, 扫描电压正程、逆程时间等于被测信号的几个周期, 就相应地扫描得出被测信号几个周期的波形, 其中扫描逆程得到的波形 (即回扫线) 是紧随扫描正程波形之后的被测信号波形的回折, 即以扫描正程结束点所在纵轴为轴线将正程之后的波形向起始方向对折, 并且使扫描逆程的结束点与扫描起始点重合, 如图 4.4 所示。

图 4.4 中, 扫描电压周期为被测信号周期的三倍, 满足式 (4-1) 的关系, 可以得到稳定的波形, 这种现象称为同步。否则, 会产生左移或右移的不稳定波形或亮带。

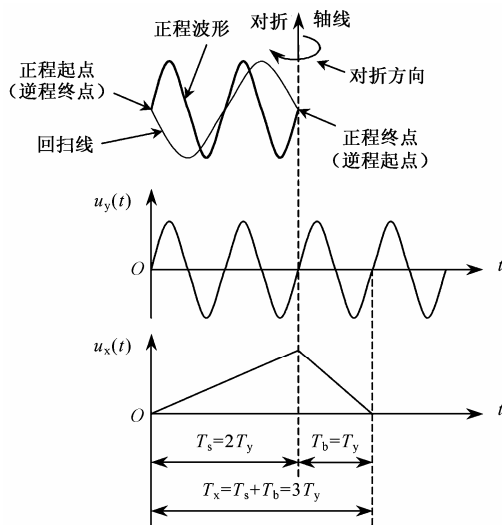


图 4.4 显示波形的取得

示波管除供电部分外，再加上扫描电压产生部分（即 X 通道）和被测信号变换部分（即 Y 通道）则构成示波器。示波器一般采用电平触发的方法获取被测信号的周期信息，从而实现扫描电压与被测信号的同步，这个过程称为触发同步，在这种状态下的扫描称为触发扫描，是示波器优先采用的扫描方式。有时，扫描电压是在自激状态下产生的，这种扫描方式称为连续扫描。有时扫描电压是在手动控制下产生的，称之为单次扫描，单次扫描适于观测非周期性信号。有时在自动电路控制下，连续扫描和触发扫描可以实现自动变换，这种扫描方式称为自动扫描，是操作示波器时通常选用的扫描方式。

上述扫描电压均为锯齿波电压，如果只在水平偏转板上加扫描电压，在荧光屏上会产生一条可反映时间长短的水平亮线，称之为时间基线，简称为时基线，这种扫描方式称为直线扫描。

综上所述，示波器波形显示原理的条件和基础如下。

- ① 荧光物质的余辉现象是示波器显示波形的基础。
- ② 示波管和示波器的线性偏转特性是示波器显示不失真波形、测量有关参数的原理依据。
- ③ 扫描正程电压必须是与时间呈正比的周期性锯齿波，在每对偏转板上所加电压必须是大小相等、极性相反的对称电压。
- ④ 被测信号必须是周期性信号，并与扫描电压满足同步条件。
- ⑤ 为了保证每次扫描得到的波形能够在荧光屏上水平重合，扫描休止期是必不可少的。具体内容参见 4.5.2。

## 4.3 通用示波器的基本组成及性能指标

### 4.3.1 基本组成

通用示波器主要由 X 通道（HORIZONTAL）、Y 通道（VERTICAL）、主机三大部分组成。单踪示波器的基本组成如图 4.5 所示。

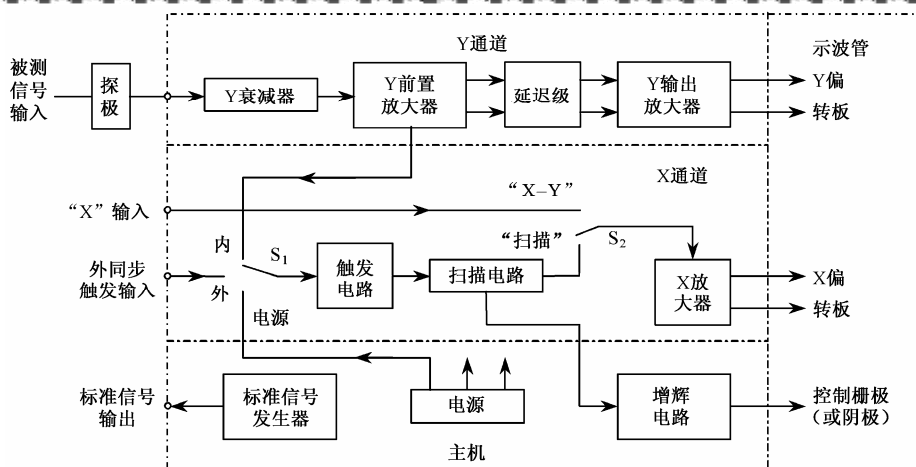


图 4.5 通用示波器基本组成

### (1) X 通道（水平系统）

X 通道由触发电路、扫描电路和 X 放大器组成。它的主要作用是：在触发信号的作用下，输出大小合适、极性相反的对称的扫描电压，以驱动电子束水平偏转。

### (2) Y 通道（垂直系统）

Y 通道由衰减器、前置放大器、延迟级、输出放大器等组成。它的主要作用是：对单端输入的被测信号进行变换处理成为大小合适、极性相反的对称信号加至 Y 偏转板上，使电子束产生垂直偏转。

### (3) 主机部分

主机部分主要包括标准信号源、增辉电路、电源、示波管等部分。增辉电路的作用是：在扫描正程时使波形增辉，扫描逆程或扫描休止期时使回扫线和休止线消隐；或在外加高频信号的作用下，对显示波形进行亮度调制，即使波形亮暗变化情况受外加信号的控制，波形由实线变为虚线，由此可测量信号周期或频率。

标准信号源用于提供幅度、周期等都很准确的方波信号，例如 1kHz、10mV<sub>P-P</sub> 的方波，以便对示波器有关性能指标进行校准或调整。

由于增辉信号是加在示波管的控制栅极或阴极上的，而控制栅极或阴极均与偏转板垂直，符合三维坐标关系，故增辉电路等又称为 Z 轴系统，有时也将主机部分称为 Z 轴系统。有关主机部分的内容不再进行详细介绍。

## 4.3.2 主要性能指标

### 1. 频带宽度 $BW$ 和上升时间 $t_r$

如不加说明，示波器频带宽度  $BW$  均为 Y 通道的频带宽度，它是 Y 通道输入信号上、下限频率  $f_H$ 、 $f_L$  之差，即  $BW=f_H-f_L$ 。现代示波器的  $f_L$  一般延伸至 0Hz，因此频带宽度可用上限频率  $f_H$  来表示。

上升时间  $t_r$  用于表示在输入脉冲等瞬变信号时示波器 Y 通道的过渡特性（瞬态响应特性），即在 Y 通道输入端加一个理想的脉冲信号，显示波形从稳定幅度的 10% 上升到 90% 所需的时间，它反映出示波器 Y 通道能否跟得上输入信号变化的性能，上升时间越短，性能越



好, 可测信号的频率越高。

频带宽度  $BW$  与上升时间  $t_r$  之间存在的关系是:

$$BWt_r \approx 0.35$$

式中,  $BW$  (或  $f_H$ )、 $t_r$  的单位分别为 MHz、 $\mu s$ 。

为了在测量时不产生明显的测量误差, 通常要求  $t_r \leq t_{ry}/3$  ( $t_{ry}$  为被测信号上升时间), 否则, 应按下式修正:

$$t_{r1} = \sqrt{t_{r2}^2 - t_r^2} \quad (4-2)$$

式中,  $t_{r1}$  为被测脉冲实际上升时间,  $t_{r2}$  为根据波形直接测出的被测脉冲上升时间,  $t_r$  为示波器上升时间。

## 2. 扫描速度

扫描速度是单位时间内亮点水平移动距离, 单位为 “cm/s” 或 “DIV/s”, 数值越大, 显示的波形越宽, 反之, 越窄。扫描速度的倒数称为时基因数, 单位为 s/DIV。

示波器常用时基因数进行水平标度, “时基因数” 旋钮一般按 “1, 2, 5” 的顺序分成很多挡。另外, 示波器还设有时基因数 “微调” 旋钮、“扩展” 开关, 二者分别用于连续调节和成倍扩展波形宽度, 它们置于 “校准”、“ $\times 1$ ” 位置时, 时基因数的实际大小等于 “时基因数” 旋钮指示的数值。

## 3. 偏转灵敏度

偏转灵敏度 (亦称为偏转因数) 是指在输入信号作用下, 亮点在荧光屏垂直方向移动 1div 所需的电压值, 单位为 V/DIV, 数值越小, 波形幅度越大。偏转灵敏度是通过变换 Y 通道衰减器的衰减比, 从而改变加至 Y 偏转板的信号电压的大小来实现的。偏转灵敏度的倒数称为偏转因数 (有的称为偏转灵敏度), 单位为 DIV/V。

示波器常用偏转灵敏度进行垂直标度, 按 “1—2—5” 的顺序分成很多挡。另外, 示波器还设有偏转灵敏度 “微调” 旋钮, “微调” 旋钮通过改变 Y 输出放大器的电压增益来连续调节波形的显示幅度。当 “微调” 旋钮置于 “校准” 位置时, 偏转灵敏度的实际大小等于 “偏转灵敏度” 旋钮所指示的数值。

## 4. 输入阻抗 $Z_i$

示波器输入阻抗  $Z_i$  等效为示波器输入电阻  $R_i$  和输入电容  $C_i$  的并联。通常规定  $R_i = (1 \pm 5\%) M\Omega$ , 要求  $C_i$  随频带宽度的增加而减小,  $C_i$  一般在 35pF 左右。测量高频信号时应考虑输入电容的影响。

## 5. 输入方式

输入方式即输入耦合方式, 一般有直流 (DC)、交流 (AC) 和接地 (GND) 三种耦合方式。

接地耦合将示波器 Y 通道输入端短路, 一般用于确定测量直流电压时零电平的位置。

交流耦合可隔离被测信号中的直流及慢变化分量, 抑制工频干扰, 便于测量高频及交流瞬变信号。

直流耦合即直接耦合, 将输入信号所有成分都加到示波器上。交替变换 “交流耦合” 和 “直流耦合” 可以测出交流信号中直流成分的大小。





## 6. 触发源选择方式

触发源是指用于提供产生扫描电压的同步信号来源，一般有内触发（INT，Internal）、外触发（EXT，External）和线触发（LINE）三种方式，双踪示波器的内触发方式又有  $\text{CH}_1$ 、 $\text{CH}_2$  之分。内触发是指由被测信号产生同步触发信号。外触发是指由外部电路提供的信号产生同步触发信号。线触发又称为电源触发，是指利用示波器内部工频电源产生同步触发信号。

## 4.4 通用示波器Y通道（垂直系统）

示波器 Y 通道主要由输入电路、前置放大器、延迟级和输出放大器等组成，如图 4.5 所示。示波器 Y 通道的主要作用是把被测信号变换成为大小合适的双极性对称信号后，加到 Y 偏转板上，使显示的波形适于观测；向 X 通道提供内触发信号源；补偿 X 通道的时间延迟，以观测到诸如脉冲等信号的完整波形。

### 4.4.1 输入电路

输入电路主要包括探极、耦合方式变换开关、衰减器、阻抗变换及倒相放大器等部分，如图 4.6 所示。

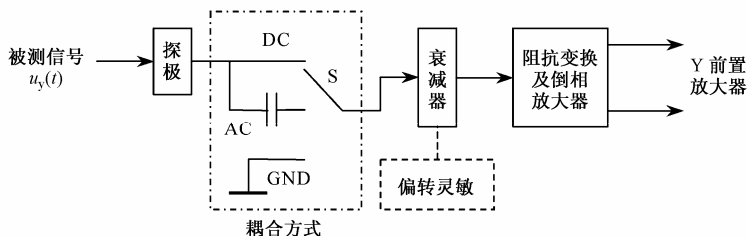


图 4.6 Y 通道输入电路

### 1. 探极

被测信号与示波器的连接可以选用引线或附带的探极，通常选用高频特性良好、抗干扰能力强的探极。

探极分为有源探极和无源探极两种，探极中通常设置有衰减器。有源探极又称为 FET（Field Effect Transistor，场效应管）探头，它具有良好的高频特性，衰减比为 1:1，适于测试高频小信号，但需要示波器提供专用电源。无源探极的衰减比（输入/输出）有 1:1、10:1 和 100:1 三种，前两种的应用比较普遍，后一种通常用于高频测量。当探极衰减比为 10:1 或 100:1 时，被测电压值是示波器测得电压的 10 倍或 100 倍。

无源探极的结构如图 4.7 所示。如果要正确地测量高频波和方波，需要调节探极补偿电容器  $C$ 。补偿电容的位置有的在探针处（见图 4.7（a）），有的在探极末端，如图 4.7（b）或在校准盒内。调节补偿电容时，将示波器标准信号发生器产生的方波加到探极上，用螺丝刀左右旋转补偿电容  $C$ ，直到调出图 4.8（a）所示的方波（即正确补偿）为止。否则，会出现图 4.8（b）、4.8（c）所示的电容过补偿或欠补偿情况。原则上，示波器的探极应专用。

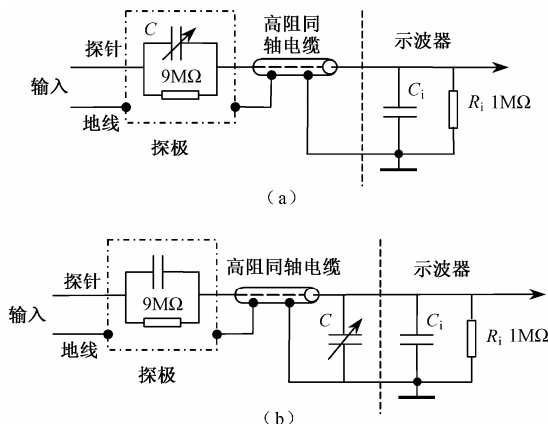


图 4.7 两种无源探极的结构

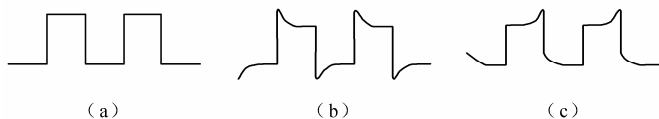


图 4.8 探极补偿情况

正确使用探极，可以提高示波器的输入阻抗，增强示波器的抗干扰能力，扩展示波器的电压量程。接入探极后，一般可以使示波器输入电阻提高到  $10\text{M}\Omega$ 、输入电容减小到十几  $\text{pF}$ 。

## 2. 耦合方式选择开关

耦合方式选择开关一般有 DC、AC 和 GND 三个挡位。在不断开被测信号的情况下，GND 耦合为示波器提供测量直流电压时的参考零电平。具体内容参见 4.3.2。

## 3. 衰减器

衰减器一般为阻容步进衰减器，其电路原理图如图 4.9 所示。改变衰减器衰减比，也就改变了示波器的偏转灵敏度，从而使显示波形的幅度得以调整。“偏转灵敏度”旋钮每挡对应的阻容衰减器是唯一的。

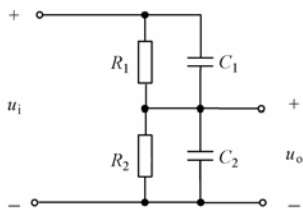


图 4.9 阻容步进衰减器原理图

对于图 4.9 所示的阻容衰减器，只有当满足  $R_1C_1=R_2C_2$  时，衰减器才具有平坦的幅频特性，即示波器偏转灵敏度与输入信号频率无关，其衰减比为  $R_2/(R_1+R_2)$ 。

## 4. 阻抗变换及倒相放大器

阻抗变换及倒相放大器的作用是，将来自衰减器的单端输入信号变换为后级差分放大器



所需的双端输出信号，以克服放大器零点漂移的影响，提高放大器输入阻抗，隔离前后级的影响，提供 Y 偏转板所需的对称信号。

与阻抗变换及倒相放大器电路有关的旋钮有：直流“平衡”及偏转灵敏度“微调”等旋钮。“微调”可以连续调节显示波形的幅度，适当调节“平衡”可以避免因为偏转灵敏度的改变而使波形产生位移，示波器面板上一般不予设置。

### 4.4.2 前置放大器

前置放大器的作用是，对前级输出信号进行初步放大，补偿延迟级对信号的损耗；为 X 通道的触发电路提供大小合适的内触发信号，以得到稳定可靠的内触发脉冲。

与前置放大器有关的开关旋钮有，“倒相”开关、垂直“移位”旋钮。调节“倒相”开关改变加在前置放大器的双端输入信号的极性使显示波形倒置；通过“移位”旋钮调节同轴双联互调电位器反面对称地调节前置放大器双端输出信号中的直流成分而使波形垂直移位。

### 4.4.3 延迟级

#### 1. 脉冲信号扫描方式的选用

触发扫描和连续扫描是示波器基本的扫描方式。为了显示稳定可靠、便于观测的脉冲波形，通常采用内触发扫描方式而不是连续扫描方式。

假设示波器显示屏水平尺寸为 10DIV (10cm)，如果选用连续扫描方式观察如图 4.10 (a) 所示占空比为 1:1000 的脉冲信号，将会出现以下几种情况。

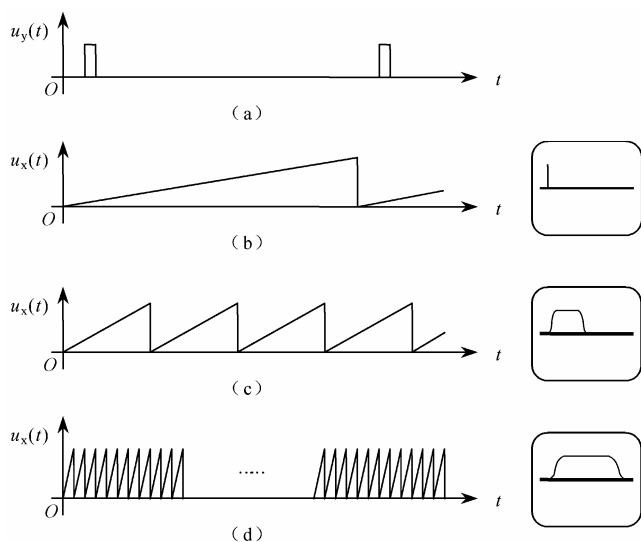


图 4.10 连续扫描脉冲信号时显示的波形

① 当连续扫描速度与脉冲信号周期相等时，计算得知显现脉宽的理论尺寸仅为 0.1mm，显然不适合观测，在荧光屏上显示的只是一条水平亮线，脉宽部分则相等看不到如图 4.10 (b) 所示。

② 当连续扫描速度加快时，虽然脉宽部分加宽，但由于扫描脉冲间歇部分的次数太多，会在荧光屏上出现一条较亮的水平线，而脉宽部分则在水平线的对比下很难观察，如



图 4.10 (c) 所示。

③ 当连续扫描周期与脉宽相同时, 虽然能够加宽显示的脉宽, 但在亮线的对比下仍难以观察, 如图 4.10 (d) 所示。

综上所述, 连续扫描方式扫描脉冲信号时, 显示图形中会始终存在一条水平亮线。该亮线不仅对显示波形形状产生干扰, 还由于亮度较强而影响脉宽的观察。当连续扫描速度太慢时, 还会因为占空比很小而使显示脉宽的水平尺寸很窄而不适合观察, 甚至不能显示。

如果选用触发扫描方式则不会出现上述问题, 触发扫描方式适于观察脉冲信号, 一般选用内触发扫描。

## 2. 延迟级的作用

采用内触发扫描时, 只有当被测信号达到一定的触发电平时, 才能产生触发脉冲并形成扫描电压, 但被测信号从零电平开始上升到一定的触发电平均需经历一定的时间, 使得扫描电压总要滞后于被测信号 (即 X 通道存在时间延迟), 导致被测信号的前沿无法完整显示, 如图 4.11 (d) 所示。为了显示完整的被测信号波形, 在 Y 通道中设置延迟级对被测信号进行延迟使扫描电压超前于被测信号 (即补偿 X 通道的时间延迟), 延迟时间一般为  $60 \sim 200 \text{ ns}$ , 常取  $100 \text{ ns}$  左右。

图 4.11 为延迟级原理示意图, 图 4.11 (a) ~ 图 4.11 (d) 分别为被测信号  $u_y(t)$ 、触发脉冲  $p(t)$ 、扫描电压  $u_x(t)$  的波形和被测信号的显示波形,  $U_t$  为触发电平。由此可见, 经过延迟级适当延迟后即可在荧光屏上得到完整的被测信号波形。但观测正弦波等缓慢变化的信号时, 延迟级的作用并不显著, 故简易示波器中一般不设置延迟级。

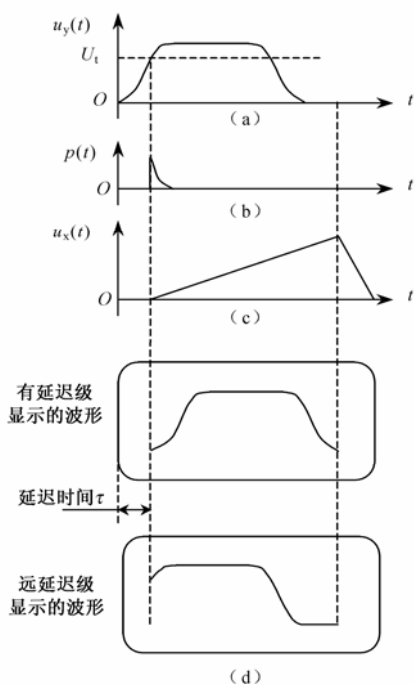


图 4.11 延迟级原理示意图



#### 4.4.4 输出放大器

为了克服零点漂移等的影响,并使加在 Y 偏转板上的电压为极性相反的对称电压,输出放大器一般采用差分放大器。其作用是对来自前级的信号进行放大,使电子束在垂直方向上产生足够大的偏转,便于观测微弱信号。

与该电路有关的开关旋钮主要有“倍率”、偏转灵敏度“微调”、“寻迹”等开关旋钮。如果“微调”旋钮已设置在阻抗变换及倒相放大器中,则不再出现在输出放大器中,反之,则不再出现在阻抗变换及倒相放大器中。“倍率”开关通过成倍增大放大器增益而使显示波形幅度成倍增大;“微调”旋钮通过连续改变放大器增益而实现偏转灵敏度的调节;调节“寻迹”开关按钮则是将 Y 放大器输入端接地来实现垂直方向寻迹的。

### 4.5 通用示波器X通道（水平系统）

示波器 X 通道主要由触发电路、扫描电路及 X 放大器等组成,如图 4.12 所示。它的主要作用是产生扫描电压,使波形在水平方向上展开;给示波管提供增辉、消隐脉冲;提供双踪示波器交替显示时的控制信号。

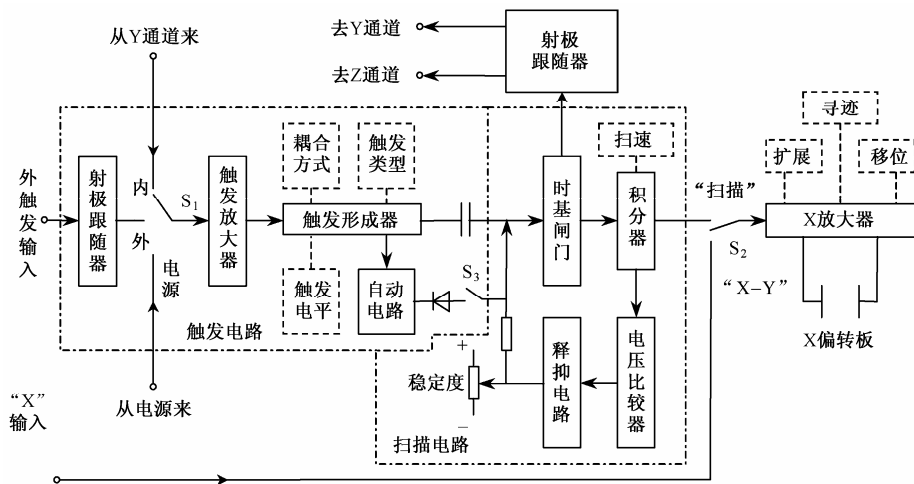


图 4.12 X 通道组成框图

#### 4.5.1 触发电路

触发电路用来选择触发源并产生稳定可靠的触发信号,以触发产生稳定的扫描电压。

如图 4.13 所示,触发电路主要由触发源选择开关  $S_1$ 、触发耦合方式选择开关  $S_2$ 、触发电平与斜率选择器、放大整形电路等组成。图 4.13 中  $S_3$  为“触发极性”选择开关,电位器 RP 为“触发电平”调节器。

##### (1) 触发源

触发源 (TRIG SOURCE) 指的是用于产生触发脉冲的信号源,有内触发、外触发、电源触发三种。双踪示波器内触发源又分为  $CH_1$  和  $CH_2$ 。具体内容参见 4.3.2。

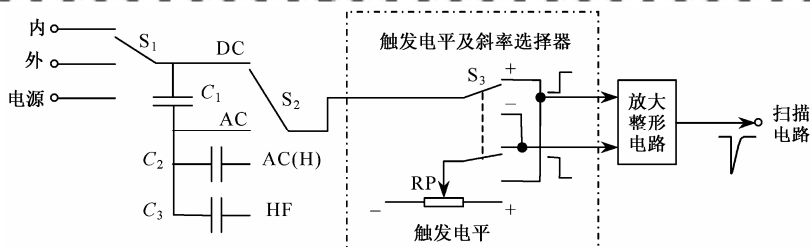


图 4.13 触发电路组成框图

## (2) 触发耦合方式

触发耦合 (TRIG COUPLING) 方式是指选择触发源中何种成分来产生触发脉冲, 有 DC、AC、AC (H) 和 HF 四种方式。

DC 耦合, 即直接耦合, 常用于外触发或连续扫描方式。适于观察直流或缓慢变化的信号或频率较低且有直流成分的信号。

AC 耦合是一种常用的方式, 因  $C_1$  的接入, 适于低频到高频信号的触发。

AC (H) 为低频抑制耦合,  $C_1$  和  $C_2$  串联, 阻抗增大, 有利于抑制工频 2kHz 以下的低频干扰。

HF High Frequency 为高频耦合, 耦合电容较小, 适于 5MHz 以上信号的观测。

## (3) 触发方式

示波器直线扫描方式分为触发、连续、高频、单次等方式。

触发扫描即常态扫描, 是示波器优先采用的扫描方式。只有在有触发信号时, 扫描电路才产生扫描电压; 无触发信号时, 不产生扫描电压, 示波器黑屏。该扫描方式适于观测脉冲等信号。

连续扫描时, 不管是否有触发信号, 扫描电路始终在自激状态下产生扫描信号, 较少使用。

如图 4.12 所示, 当  $S_3$  闭合时为自动扫描。自动扫描是连续扫描与触发扫描的结合, 二者自动变换。当无触发信号或被测信号时, 扫描电路工作在连续扫描状态, 荧光屏上出现一条时基线; 当有触发信号或被测信号时, 采用触发扫描。该扫描方式适于观测低频信号。

高频扫描时, 触发电路变为自激多谐振荡器, 产生高频自激信号 (约 2MHz)。该扫描方式适于观测高频信号。

单次扫描为特殊的触发扫描方式。扫描电路在触发信号作用下产生一次触发扫描以后, 不再受触发信号作用; 如果需要第二次扫描, 必须人工恢复扫描电路为等待状态。该扫描方式适于观测单次瞬变或非周期性信号。

另外, 有的示波器带有 TV 触发, 将分离出的电视行、场同步信号变换为 TV 触发脉冲, 可以显示电视行信号和场信号。

## (4) 触发电平及斜率选择器

触发电平及斜率选择器实际上是一个电压比较器, 用于选择合适稳定的触发点, 以控制扫描起始时刻。为了使波形显示稳定, 应选择触发源或被测信号的同相位点作为每次扫描的起始点。

触发电平 (LEVEL) 可以由“触发电平”旋钮进行调节, 它有正电平、负电平和零电平之分, 对应的触发点分别位于触发信号的上部、下部和中部。



触发斜率即触发极性（SLOPE），是指触发点位于触发信号的上升沿还是下降沿。位于上升沿的称为正极性触发，位于下降沿的称为负极性触发。

触发电平及触发极性可以直接从显示波形上进行判断。图 4.14（a）～图 4.14（f）所示的触发电平及触发极性分别为零电平、正极性，负电平、正极性，正电平、正极性，零电平、负极性，负电平、负极性，正电平、负极性。

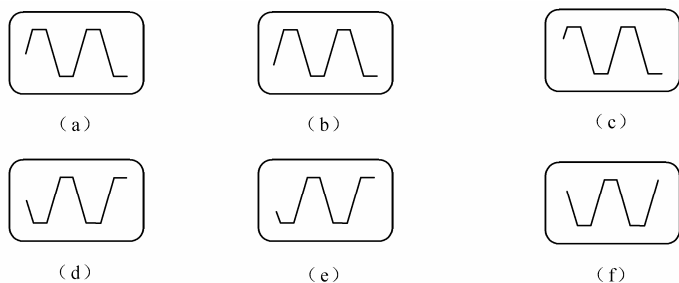


图 4.14 触发电平、触发极性与波形显示的关系

#### （5）触发放大及触发形成电路

触发放大及触发形成电路用于对前级输出信号进行放大整形，产生稳定可靠的前沿触发脉冲。前沿陡峭的触发脉冲可以使显示波形的起始点与由触发电平和触发极性确定的起始点（触发点）保持一致。

### 4.5.2 扫描电路

扫描电路又称为时基电路，其作用是：产生符合要求的扫描电压；为 Z 通道提供增辉、消隐脉冲；为双踪示波器电子开关提供交替显示的控制信号。

扫描电路主要由时基闸门电路、积分器、电压比较器和释抑电路等四个呈环状结构的电路组成，故又称为扫描环，如图 4.12 所示。图 4.15 为触发扫描时的工作波形，图中时基闸门输入低电平时，负极性触发脉冲有效，产生扫描正程。

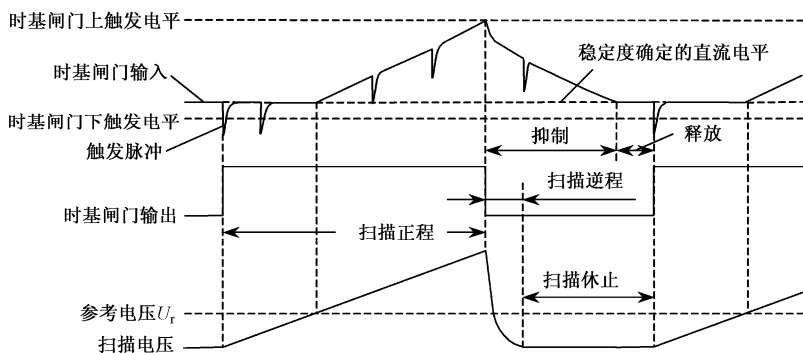


图 4.15 扫描电路工作波形图（触发扫描）

#### （1）时基闸门

时基闸门又称为扫描门，是施密特触发器。它的作用是，在触发脉冲作用下或在自激状态下产生闸门脉冲，闸门脉冲是积分器的控制信号。另外，时基闸门脉冲还通过射随器加到



Z 通道实现增辉消隐, 以及加到双踪示波器 Y 通道电子开关作为交替显示的控制信号。

在图 4.12 中, 当无信号或无触发脉冲的时间超过自动电路(暂稳态触发器)的暂稳维持时间时, 自动电路由暂稳态变为稳态输出低电平, 二极管导通, 时基闸门输入信号电平降低, 时基闸门工作在自激状态下, 即连续扫描方式, 其工作波形如图 4.16 所示; 当有触发脉冲时, 自动电路由稳态变为暂稳态输出高电平, 二极管截止, 自动电路断开与其他电路的连接, 时基闸门输入信号电平抬升, 时基闸门电路工作在触发状态下, 即触发扫描方式。

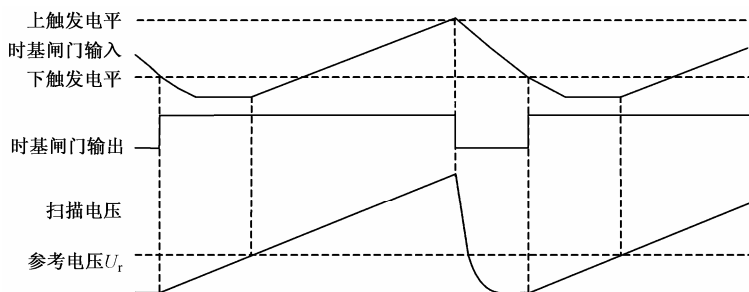


图 4.16 扫描电路工作波形图(连续扫描)

## (2) 积分器

积分器又称为扫描电压发生器, 是密勒积分器, 它具有输入阻抗高、线性好的特点, 电路原理图如图 4.17 所示。

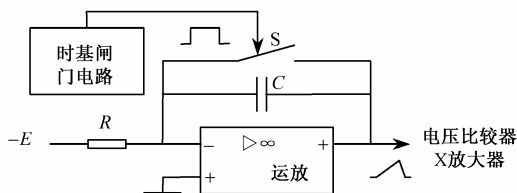


图 4.17 扫描电压发生器电路原理图

时基闸门输出的闸门脉冲控制开关 S 的断开闭合。当 S 断开时, 积分器开始积分, 产生扫描正程电压。扫描正程电压为

$$u_s(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t (-E) dt = \frac{E}{RC} t$$

改变  $RC$  的值, 即改变了扫描电压正程斜率, 也就改变了扫描速度。改变积分电阻、积分电容的旋钮称为“时基因数 (s/DIV)”旋钮。

当 S 闭合时, 积分电容放电, 产生扫描逆程电压。

## (3) 电压比较器

由于电压比较器能够控制扫描时基线的长度而又称为扫描长度电路。如图 4.18 所示, 二极管与有关电路一起构成电压比较器, 当扫描电压高于参考电压  $U_r$  时, 二极管导通, 输出信号经释抑电路送给时基闸门电路, 以结束时基闸门脉冲, 从而闭合扫描电压发生器开关 S, 进入扫描逆程。调节参考电压  $U_r$  的大小可以改变二极管导通时间, 从而调节扫描电压的幅度。



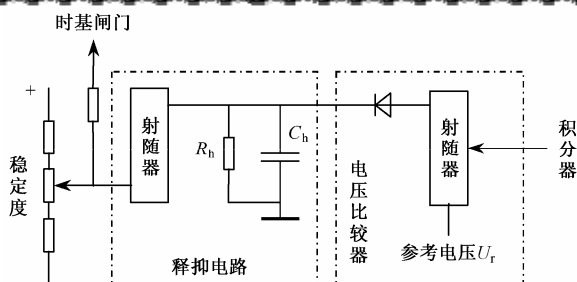


图 4.18 电压比较器和释抑电路原理图

#### （4）释抑电路

释抑电路一般为  $RC$  电路，如图 4.18 所示。释抑电路的作用是使每次扫描水平方向的起始点在荧光屏上的位置都相同，以保证每次扫描得到的波形能够重合。

当二极管导通时，扫描电压对释抑电容  $C_h$  充电。当二极管截止时，释抑电容放电，释抑电容的放电速度很慢，这样可以使时基闸门输入信号的电平被长时间抬升，使得时基闸门脉冲为低电平，图 4.17 中的开关  $S$  长时间处于闭合状态，从而保证积分电容有足够的时间进行放电。只有在积分电容放完电或放电至很小的基础上，积分器才能在触发脉冲的作用下产生扫描正程电压，从而保证每次扫描水平方向起始点的位置都相同。释抑电容放电至很小或放完电之前，无论有无触发脉冲，始终不能产生下次扫描，扫描电路处于被抑制状态；抑制状态结束至产生下次扫描电压之前，释抑电路失效，即扫描电路被释放，释抑电路名称由此而来。

“稳定度”旋钮可以调节时基闸门输入信号的直流电平，改变触发灵敏度，从而影响扫描电路的工作稳定性。同时也可由该电位器改变扫描方式，如连续扫描或触发扫描。“稳定度”旋钮一般调整至使时基闸门电路输入信号的直流电平位于时基闸门电路上下触发电平之间接近下触发电平处，调整后，一般不再对其进行调整。

扫描电路的工作过程总结如下：当时基闸门接收到触发电路输出的负极性触发尖脉冲时，闸门脉冲由低电平变为高电平，控制积分器的开关  $S$  断开，积分器开始输出正向电压。积分器输出电压除送至  $X$  放大器外，还要送给电压比较器。当积分器输出电压超过电压比较器参考电压  $U_r$  时，电压比较器导通，积分器输出电压经释抑电路反馈至时基闸门输入端，使时基闸门输入电平线性增大。当时基闸门输入电平增大到上触发电平时，闸门脉冲状态翻转，积分器开关  $S$  闭合，积分器输出电压迅速减小，电压比较器断开，释抑电容开始慢慢放去在电压比较器导通时充上的电荷，并反馈至时基闸门输入端，使时基闸门输入电平开始缓慢减小，直至释抑电容放电至很小或放完电，从而保证积分电容放完电之前，时基闸门不被触发脉冲触发，即第二次扫描必须是在前次扫描进行完毕的情况下才开始。

图 4.16 与图 4.15 中的工作过程相似，不同之处在于，当无触发脉冲时，自动电路单稳态输出低电平，将时基闸门输入电平拉低而产生连续扫描。

由此可见，积分电容仅在扫描正程时，才接入到积分器中；扫描实际过程分为扫描正程、扫描逆程和扫描等待三个过程，如果不消隐，实际显示图形如图 4.3 所示。因为扫描逆程开始时扫速极快，且越靠后速度越慢，所以图 4.3 中回扫线开始的一段很弱很直，甚至看不出。如果在示波器扫描一次后就通过手动“单次扫描（SGL）”开关切断释抑电容  $C_h$  的放电回路，则可以实现单次扫描，如果要进行下次扫描，只需通过开关接通释抑电容放电回路即可。通



过控制开关改变时基闸门输入信号直流电平可以实现连续扫描,例如下拉至时基闸门下触发电平之下。

### 4.5.3 X放大器

X放大器的作用是,将单端输入的信号进行放大变换成为大小合适、极性相反的对称信号加在X偏转板上,使电子束在水平方向上产生足够的偏转,得到合适的波形。当示波器用于显示被测信号波形时,X放大器的输入信号是扫描电压;当示波器工作在“X-Y”方式时,输入信号是外加的X信号。

“X-Y”方式时,示波器X偏转板上所加的信号不再是扫描电压而是外加的X信号,它们各自在X、Y偏转板间建立偏转电场对电子束共同作用而产生一个新的图形。例如,将两个同频正弦波加到示波器上时,得到的波形为椭圆、圆或直线。两个正弦波加到示波器上得到的图形称为李沙育图形。

与X放大器有关的开关旋钮有:“水平移位”、“扫描扩展”、“寻迹”等开关旋钮。调节“水平移位”旋钮改变水平偏转板上叠加的对称直流电压的大小来实现波形的水平移位。“扫描扩展”旋钮则成倍增大X放大器增益来实现波形的扩展。调节“寻迹”按钮将X放大器输入端接地实现水平方向寻迹。

## 4.6 示波器的多波形显示

实际工作中常常需要同时观测两个或两个以上的波形,或者观测一个信号的整体及其某个细节,即多波形显示。实现多波形显示的方法有多线显示、多踪显示和双扫描显示等。

### (1) 多线显示

多线显示利用由多束示波管构成的多线示波器来同时显示多个波形。多束示波管内装有两个或两个以上的电子枪,每个电子枪都能同时发出一条电子束,每一条电子束都有各自独立的Y偏转板,有的多束示波器还具有多个独立的扫描系统,所以每条电子束都可以单独显示一个波形,波形之间相互独立、互不影响。

多束示波器生产困难,成本高,性能较差,较少使用。

### (2) 多踪显示

多踪显示利用由单束示波管构成的多踪示波器显示多个波形。单束示波管内只有一个电子枪、一套Y偏转板。多踪示波器采用时分复用技术,利用Y通道上增设的电子开关控制被测信号轮流快速地接入Y偏转板而显示多个波形,该技术充分利用了电子开关的高速变换特性和人眼的视觉惰性。

比较常用的是双踪示波器,双踪示波器中两个波形的显示称为双踪显示。

### (3) 双扫描显示

双扫描显示又称为双时基显示,它能够显示一个信号的整体及某个细节。双扫描示波器具有两个独立的时基电路,每个时基电路又包括触发电路和扫描电路,即A触发和A扫描、B触发和B扫描,A扫描和B扫描的扫速相差很多倍。

本节只讨论双踪显示和双扫描显示。



## 4.6.1 双踪显示

### 1. 双踪显示原理

图 4.19 (a) 为双踪显示 (Dual Channel Display) 原理图。电子开关又称为通道变换器, 其输入端接前置放大器,  $S_1 \sim S_8$  为模拟电子开关。电子开关有“信道 1”、“信道 2”、“叠加”、“交替”和“断续”五种工作状态, 它们也是双踪示波器 Y 通道的五种工作方式。

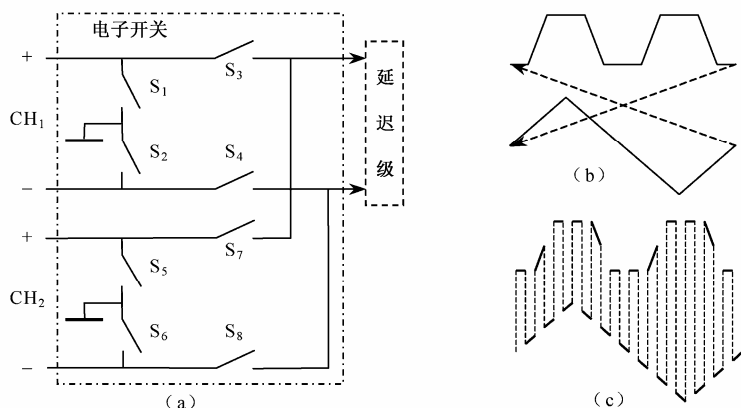


图 4.19 双踪波形显示原理示意图

#### (1) 信道 1 ( $CH_1$ )

开关  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_7$  和  $S_8$  断开, 开关  $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  和  $S_6$  闭合,  $CH_1$  输入的信号送到输出端, 而信道 2 ( $CH_2$ ) 输入的信号不能到达输出端, 只能显示  $CH_1$  输入的信号。

#### (2) 信道 2 ( $CH_2$ )

开关  $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  和  $S_6$  断开, 开关  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_7$  和  $S_8$  闭合,  $CH_2$  输入的信号送到输出端, 而信道 1  $CH_1$  输入的信号不能到达输出端, 只能显示  $CH_2$  输入的信号。

#### (3) 叠加 (ADD)

开关  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_5$  和  $S_6$  断开, 开关  $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_7$  和  $S_8$  闭合,  $CH_1$  和  $CH_2$  输入的两路信号均送到输出端, 并在负载中互相叠加, 显示叠加 (ADD) 后的波形。当  $CH_2$  输入的信号未倒相时, 实现求和 ( $CH_1+CH_2$ ), 当  $CH_2$  输入的信号被倒相后, 实现求差 ( $CH_1-CH_2$ )。

#### (4) 交替 (ALT)

交替 (ALT, Alternate) 状态时, 开关  $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$  和  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_7$ 、 $S_8$  断开或闭合的状态受时基闸门脉冲的控制, 并且每隔一个扫描周期变换一次状态, 使得信道 1 和信道 2 输入的信号轮流接通、轮流显示, 只要轮流显示的间隔时间较短, 就可交替显示出两个信号的波形。设信道 1 和信道 2 的输入分别为梯形波、三角波信号, 示波器显示的波形如图 4.19 (b) 所示。

交替方式适于观测高频信号。这是因为被测信号频率较低时, 所需扫描电压的周期长, 即交替显示同一信号的间隔时间长, 当间隔时间接近或超过人眼视觉暂留时间时, 显示波形会产生闪烁, 不便于观测。

#### (5) 断续 (CHOP)

断续 (CHOP) 状态时, 在每一次扫描过程中, 开关  $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$  和  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_7$ 、 $S_8$



的断开或闭合受电子开关内断续器（自激多谐振荡器）产生的高频振荡信号（如 200kHz 的方波）的控制，快速轮流接通两个输入信号，从而显示出每个被测信号的某一段，以后各次扫描重复以上过程。这样显示的波形是由许多线段组成的，只要开关变换频率很快、水平扫描又较慢，这些线段就很短，看起来显示的波形好像是连续的，如图 4.19 (c) 所示。

断续方式时，断续器（Chopper）还产生“断续”消隐信号，以对信号变换过程中产生的光迹进行消隐。

断续方式适于观测频率较低的信号，这是因为，被测信号频率较高时，所需扫描电压的周期短，亦即电子束水平移动速度快，但显示每一线段的时间是相等（断续器频率不变）的，这样显示的波形的断续感比较明显，不便于观测；另外，当被测信号频率很高时，要求断续器的振荡频率也很高，但断续器的频率一般是不可调的，因此断续方式不适于观测高频信号。

## 2. 双踪示波器的基本组成

双踪示波器基本组成框图如图 4.20 所示，主要有两个 Y 输入通道、一个 X 通道和主机等部分组成。双踪示波器一般可以工作于扫描方式和 X-Y 方式，分别用于显示被测信号波形和作为 X-Y 图示仪使用。内触发信号源在延迟前引入到 X 通道，两个 Y 通道后半部分是共用的。当工作于 X-Y 方式时，X 输入信号通常由外触发输入端加到示波器经射随器隔离后，再经变换开关接入到 X 放大器的，或经 CH<sub>1</sub> 衰减器输出至 X 放大器。

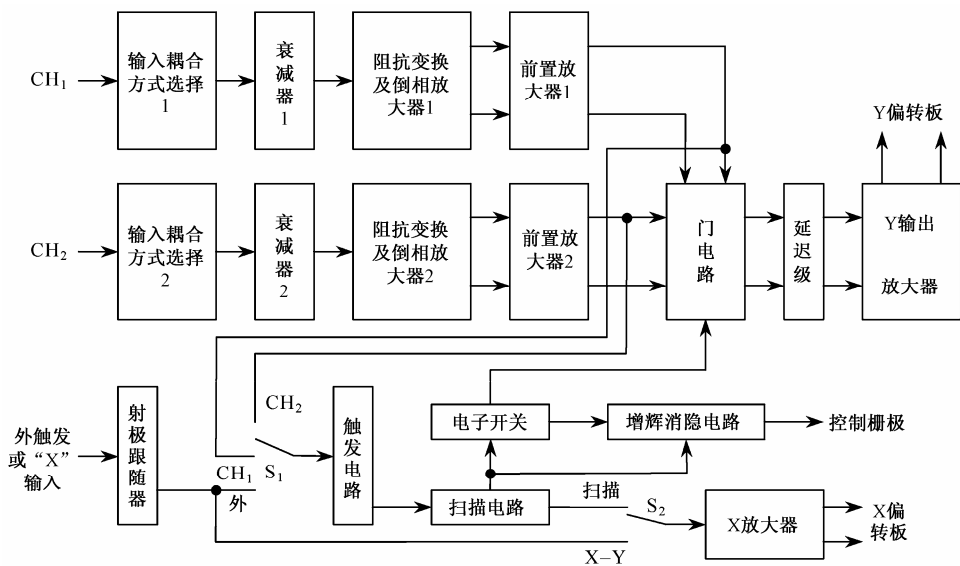


图 4.20 双踪示波器基本组成框图

### 4.6.2 双扫描显示

双扫描示波器的基本组成如图 4.21 所示。A 扫描又称为主扫描（MTB），扫描速度较慢；B 扫描又称为延迟扫描（DTB），扫描速度较快。在水平电子开关的控制下，A、B 扫描配合以实现双扫描显示。

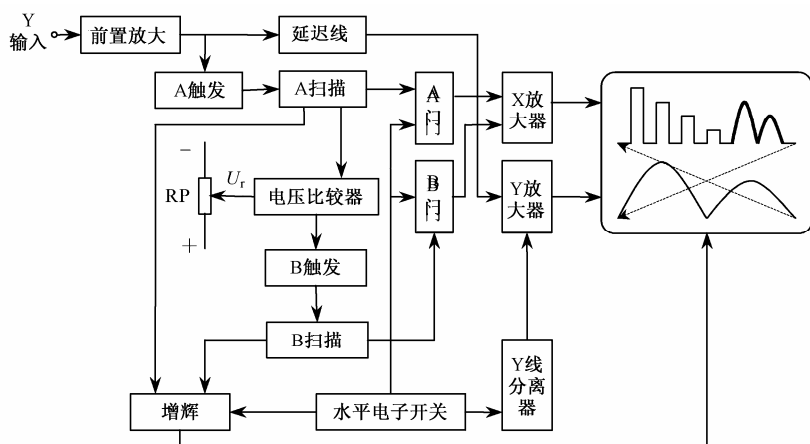


图 4.21 双扫描示波器的基本组成框图

双扫描显示分为 A 扫描、B 加亮 A 扫描、A 延迟 B 扫描、自动交替扫描、混合扫描等方式。

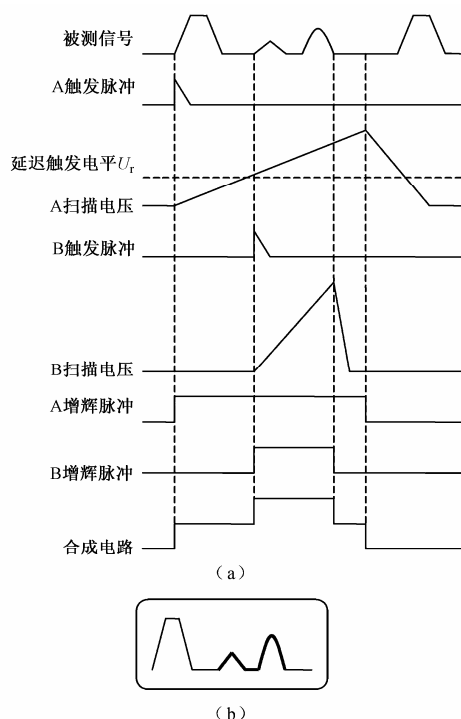


图 4.22 B 加亮 A 扫描工作波形图

该工作方式，A 门关闭，B 门开启，只有 B 扫描电压加至 X 放大器，显示的是与 B 扫描电压正程对应的波形的细节，如图 4.23 (a) 所示。由于 B 扫速较快且可调，使显示的波形细节被展开且宽度可调，调整  $U_r$  即可改变波形细节的起始位置。

#### (4) 自动交替扫描

该方式又称为自动双时基扫描，是在水平电子开关的控制下，以 A 扫描的周期为间隔，

#### (1) A 扫描

A 扫描时只有 A 扫描电路(A 触发和 A 扫描)工作，显示波形的全部或局部。

#### (2) B 加亮 A 扫描

图 4.22 (a) 为 B 加亮 A 扫描时的工作波形图。该工作方式，A 门打开、B 门关闭，A 扫描电压加至 X 放大器，并将电压比较器产生的脉冲作为 B 触发的输入信号。当 A 扫描电压超过由图 4.21 所示的 RP 确定的  $U_r$  时，B 扫描产生的 B 增辉脉冲被送至增辉电路与 A 增辉脉冲合成，使得 A 扫描显示波形的局部被 B 增辉脉冲加亮，即 B 加亮 A 扫描的扫描方式，如图 4.22 (b) 所示。

显然，B 触发和 B 扫描相对 A 扫描都延迟了一段时间，调整  $U_r$  则可以改变其延迟时间， $U_r$  称为延迟触发电平，所以 B 增辉脉冲可以在 A 扫描电压正程的任意时刻产生，即 B 可以加亮 A 扫描波形的任意细节。

#### (3) A 延迟 B 扫描

该工作方式，A 门关闭，B 门开启，只有 B 扫描电压加至 X 放大器，显示的是与 B 扫描电压



交替进行 B 加亮 A 扫描、A 延迟 B 扫描。因此,自动交替扫描可以同时显示被加亮细节的信号整体与被展开的波形细节,它实际上是 X 通道的一种“交替”方式,如图 4.21 所示。

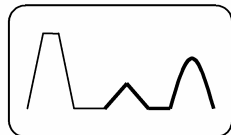
在水平电子开关的控制下, Y 线分离器交替地使 Y 放大器输出叠加极性或大小不同的直流电压,使显示波形的整体和局部能够在垂直方向上分隔开来。

#### (5) 混合扫描

该方式与 B 加亮 A 扫描的区别是: A 扫描电压和 B 扫描电压均被加至 X 放大器进行叠加。由于 B 扫描速度较快,使得被加亮的细节被展宽,但荧光屏上仅出现一个波形,如图 4.23 (b) 所示。



(a)



(b)

图 4.23 A 延迟 B 扫描与混合扫描时显示的波形

## 4.7 示波器的选择使用

### 4.7.1 示波器的选用

虽然示波器种类繁多,但使用方法相似。示波器的选用方法如下:

#### 1. 根据被测信号特性选择合适的示波器

① 定性观察频率不高的一般的周期性信号,可选用普通示波器 ( $BW=5\sim 60\text{MHz}$ ) 或简易示波器 ( $BW=100\sim 500\text{kHz}$ )。

② 观察占空比很小的脉冲信号或非周期性信号,应选用具有触发扫描或单次扫描的宽带示波器 ( $BW>60\text{MHz}$ )。

③ 观察快速变化的非周期性信号,应选用高速示波器。

④ 观察频率很高的周期性信号,应选用取样示波器。

⑤ 观察低频缓慢变化的信号,可选用低频示波器或长余辉慢扫描示波器。

⑥ 需要对两个信号进行比较时,应选用双踪示波器。

⑦ 需要对两个以上信号比较时,则选用多踪示波器或多束示波器。

⑧ 若要将波形存储起来,应选用存储示波器。

#### 2. 根据示波器性能选择合适的示波器

##### (1) 频带宽度和上升时间

一般要求频带宽度  $BW \geq 3f_{\max}$  ( $f_{\max}$  为被测信号最高频率); 示波器上升时间  $t_r \leq t_{r2}/3$ , 否则,按式 (4-2) 加以修正。

##### (2) 垂直偏转灵敏度

若要观测微弱信号,应选择较高偏转灵敏度的示波器,即 V/DIV 值较小的示波器,反之,应选择 V/DIV 值较大的示波器。

##### (3) 输入阻抗

尽量选用高输入阻抗的示波器。

##### (4) 扫描速度

被测信号频率越高,所需示波器扫描速度越快,反之,扫描速度越慢。



### 3. 使用注意事项

- ① 选择合适的电源，并注意机壳接地，用前预热。
- ② 经探极衰减后的输入信号不能超过示波器输入电压的允许范围，并注意防止触电。
- ③ 根据需要，选择合适的输入耦合方式。
- ④ 辉度要适中，不宜过亮，亮点不能长时间停留在同一点上。尽量避免在阳光直射或明亮环境下使用示波器。
- ⑤ 聚焦要合适，不宜太散或过细。
- ⑥ 测量前要注意调节“轴线校正”，使荧光屏水平刻度线与显示波形的水平轴线平行。
- ⑦ 尽量在荧光屏有效尺寸内测量。
- ⑧ 探极要专用，用前要校正。注意正确使用探极衰减器。
- ⑨ 连接示波器与被测电路时，如果被测信号为几百千赫兹以下的连续信号，可用一般导线连接；若信号幅度较小，可以使用屏蔽线连接；测量脉冲信号或高频信号时，必须用高频同轴电缆连接。尽管如此，应尽量使用探极连接。
- ⑩ 波形不稳定时，通常按调节“触发源”、“触发电平”、“触发耦合方式”、“触发方式”、“扫描速度”旋钮的顺序进行调节。如果仍不稳定，可反复调节上述旋钮或试验调节“偏转灵敏度”等旋钮。
- ⑪ 直接测量电压（或时间量）时，偏转灵敏度（V/DIV）“细调”（或时基因数（t/DIV）“细调”旋钮）旋钮务必置于“校准”位置，否则，将产生大的测量误差。

#### 4.7.2 示波器的正确使用

Y-TEKTRONIX2261 型双踪示波器是 20MHz 带宽的精密便携式通用示波器，它选用高清晰示波器，具有图形显示明亮、清晰、操作方便、构造新颖等特点。

##### 1. 主要技术性能

###### (1) Y 通道

###### 1) 偏转灵敏度

5mV/DIV~5V/DIV，按 1-2-5 顺序分 9 挡，误差为±5%；扩展×5 时误差为±10%。

###### 2) 频带宽度

DC 耦合为 0~20MHz，AC 耦合为 10Hz~20MHz。

###### 3) 输入阻抗

直接输入时：(1±2%) MΩ/30pF±5pF；经 10:1 探极输入时：(10±5%) MΩ//16.2pF±2pF。

###### 4) 最大输入电压

400V<sub>PK</sub>，即输入电压的峰值不能超过 400V。

###### 5) 工作方式

CH<sub>1</sub>（信道 1），CH<sub>2</sub>（信道 2），ALT（交替），CHOP（断续），ADD（叠加）。

###### 6) Y 通道延迟时间

Y 通道延迟时间在 100ns 以上

###### (2) X 通道

###### 1) 时基因数

0.1μs / DIV~0.2s / DIV，按 1-2-5 顺序分 20 挡，误差为±5%；扩展×5 时，误差为±8%。



## 2) 工作方式

直线扫描方式和 X-Y 方式。直线扫描方式分为 AUTO（自动）、NORM（触发）和 SGL（单次）三种。

## 3) 触发方式

CH<sub>1</sub>, CH<sub>2</sub>, LINE（电源）, EXT（外）。

## 4) 耦合方式

AC, DC, TV（电视场同步信号）, NORM。

## 5) 外触发最大输入电压

400V<sub>PK</sub>（DC+AC peak，直流与交流峰值之和）。

## (3) 主机

### 1) 显示尺寸

10DIV×8DIV（1DIV=1cm）

### 2) 后加速阳极电压

2kV

### 3) 显示颜色

绿色

### 4) Z 调制（亮度调制）

频率范围：0Hz~1MHz；最大输入电压：50V<sub>PK</sub>；输入电阻：10kΩ。

### 5) X-Y 方式频率范围

0~1MHz。

### 6) 校准信号

方波，(0.5±2%) V<sub>p-p</sub>，(1±2%) kHz。

## 2. 2261 型双踪示波器面板结构

2261 型双踪示波器前面板结构如图 4.24 所示，各开关旋钮的作用如下。

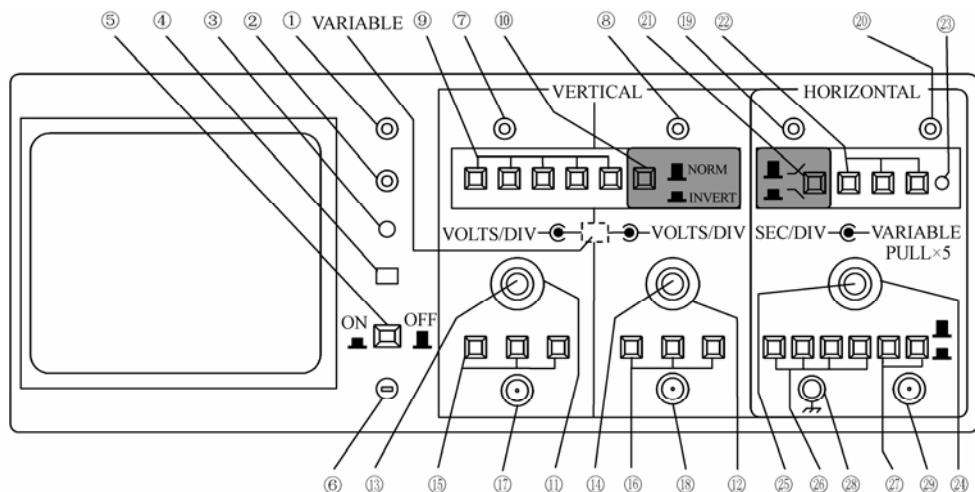


图 4.24 Y-TEKTRONIX 2261 型示波器前面板图

## (1) 主机部分

### 1) INTENSITY（辉度）





控制显示波形的亮暗, 测量前一般置于中间位置。

## 2) FOCUS (聚焦)

调节聚焦可使波形清晰可辨, 测量前一般置于中间位置。

## 3) TRACE ROTATION (轴线校正或光迹旋转)

使扫描时基线同荧光屏内刻度水平线平行。一般情况下无需调整, 除非发现时基线有倾斜。

## 4) POWER INDICATOR (电源指示)

电源开关 POWER 按下时, 电源接通, 指示灯亮。

## 5) POWER (电源开关)

电源总开关按下时, 接通电源。

## 6) PROBE ADJUST (探极调整信号或标准信号输出端)

提供  $0.5V_{P-P}$ , 1kHz 标准方波信号, 用于调整探极补偿电容、偏转灵敏度或时基因数。

### (2) 垂直通道 (VERTICAL)

#### 1) VERTICAL POSITION (垂直移位)

改变  $CH_1$ ,  $CH_2$  端输入波形在荧光屏垂直方向所处的位置。顺时针方向旋转时, 波形向上移动, 反之, 向下移动。

#### 2) VERTICAL MODE (垂直工作方式)

改变电子开关的工作状态, 按下自左至右的按键分别显示  $CH_1$ ,  $CH_2$ , ALT (交替), CHOP (断续), ADD (叠加) 波形, 测量前一般按下  $CH_1$  键。交替方式适于观测需要中、高速扫描的高频信号。断续方式适于观测需要低速扫描的低频信号, 选用的时基因数不小于  $1ms/DIV$ , 但不能使显示波形产生闪烁。

#### 3) INVERT ( $CH_2$ 倒相关关)

按下 INVERT 键时, 显示被倒相的  $CH_2$  信号。按下 INVERT 键和 ADD 按键实现  $CH_1-CH_2$  的叠加; 只按下 ADD 键实现  $CH_1+CH_2$  的叠加。测量前一般处于弹出状态。

#### 4) VOLTS/DIV (偏转灵敏度)

改变  $CH_1$ ,  $CH_2$  的垂直偏转灵敏度, 调节显示波形幅度。测量前一般置于“ $\times 1$ ”处的“.1V”挡。

#### 5) VARIABLE (偏转灵敏度细调)

连续调节  $CH_1$ ,  $CH_2$  输入偏转灵敏度, 用于连续调节显示波形的幅度。顺时针旋转到底为“校准 (CAL, Calibrate)”位置。测量前或直接测量电压时, 应置于“校准”位置。

#### 6) AC-GND-DC (输入耦合方式: 交流、接地、直接)

分别选择  $CH_1$ ,  $CH_2$  的输入耦合方式。选定输入信号中的某种成分进行显示。测量前一般选择“DC”。

#### 7) $CH_1$ OR X ( $CH_1$ 或者 X), $CH_2$ OR Y ( $CH_2$ 或者 Y)

被测信号输入端。当 SEC/DIV 处于“X-Y”时,  $CH_1$  端输入的信号加到 X 通道,  $CH_2$  端输入的信号加到 Y 通道。

### (3) 水平通道 (HORIZONTAL)

#### 1) HORIZONTAL POSITION (水平移位)

改变波形在荧光屏水平方向的位置。顺时针方向旋转时, 波形向右移动, 反之, 向左。测量前一般置于中间位置。



## 2) LEVEL (触发电平)

选择触发扫描的起始点,即确定波形起始点在垂直方向上的位置。发现波形不稳定时,一般要先调节“LEVEL”旋钮。测量前一般置于中间位置。

## 3) SLOP (触发极性)

选择触发极性。弹出时正极性触发,即波形起始点位于上升沿;按下时,选择负极性触发,即波形起始点位于下降沿。测量前一般选择正极性触发。

## 4) SWEEP MODE (扫描方式)

选择扫描方式。按下自左至右的按键时分别选择 AUTO (自动扫描)、NORM (常态扫描或触发扫描)、SGL (单次扫描)。自动扫描适于观测 20Hz 以上的信号,无信号输入时,显示水平基线;触发扫描适于观测低频信号或脉冲信号,无信号输入时,示波器黑屏。单次扫描适于观测不稳定信号或非周期性信号,只有在按下一次时,才显示一次波形,要继续显示需要再按下一次。测量前一般选择自动扫描。

## 5) TRG'D READY (触发状态指示)

用于指示触发状态。自动扫描或触发扫描时,指示灯亮表明进行的是触发扫描。单次扫描方式时,指示灯亮表明处于下次触发扫描前的准备状态。

## 6) SEC/DIV (时基因数调节)

改变电子束水平扫描速度,调整波形宽度。顺时针调节时,扫速加快,波形变宽,反之,变窄。开关逆时针旋到底时,示波器工作于 X-Y 方式,用作 X-Y 图示意。测量前一般置于 .5ms 挡。

## 7) VARIABLE PULL×5 (时基因数细调;拔出时,扫速扩展 5 倍)

连续改变电子束扫描速度,逐渐调整波形宽度。测量前或直接测量周期等时间量时,应置于“校准”位置。拔出时,扫速扩展 5 倍,即时基因数变为以前的 1/5,波形展宽 5 倍。

## 8) TRIGGER SOURCE (触发源)

选择产生触发脉冲的信号,有 CH<sub>1</sub>, CH<sub>2</sub> (CH<sub>1</sub>, CH<sub>2</sub> 属于内触发), LINE (电源触发) 和 EXT (外触发)。测量前一般选择 CH<sub>1</sub>。

## 9) COUPLING (触发耦合方式选择)

选择触发源中某种成分的信号产生触发脉冲,有 AC, DC, NORM, TV (电视场信号) 等耦合方式。测量前一般选择“AC、NORM”,即两个触发耦合方式选择按钮处于弹出位置。

## 10) GROUND (接地)

示波器漏电保护接地端。

## 11) EXT INPUT (外触发源输入)

外触发信号源输入端。

除前面板上的上述开关旋钮之外,示波器后面板上还有下列主机部分的开关与插座:

### 1) Z-INPUT (Z 轴输入)

亮度调制信号输入端。亮度调制又称为调辉,即亮度调制信号(高频)经 Z 通道加到示波管控制栅极或阴极上,使被测信号(低频)波形的亮暗变化情况受亮度调制信号的控制,波形由虚线段构成。5V<sub>P-P</sub> 的信号一般就能产生明显的亮度调制,要求该信号应与被测信号保持同步,否则,构成波形的线条将产生移动。根据这一现象,可以测量周期、频率、时间等参数。

### 2) POWER OUTLET (电源输入插座)



示波器交流电源输入插座。

### 3) LINE VOLT SELECTOR（电源电压选择开关）

用于选择 115V 或 230V 交流电源。

### 4) FUSE HOLDER（保险丝座）

放置或更换保险丝的插座。

## 3. 示波器的正确使用

使用新仪器之前，除了要仔细阅读技术说明书之外，还要认真分析总结面板上有关符号与标注的意义。这对于操作者来说是很重要的，因为从中可以了解到各开关旋钮的作用及其使用方法，甚至包括仪器的基本组成，例如，根据 2261 型示波器面板上开关旋钮的区域划分可初步判断出该仪器由三部分组成，即“VERTICAL”、“HORIZONTAL”及左边的主机部分；再例如，“INVERT”按钮及其标识处被涂黑，则说明该倒相开关仅对  $\text{CH}_2$  起作用；由“偏转灵敏度”及“微调”旋钮上方的标识也可从中体会出对应旋钮的作用。

示波器的使用比较复杂，初次使用者更应按上述要求去做，当然，示波器的使用也遵循一定的规律，例如：

① 测量前，将有关开关旋钮置于相应位置（注意选择自动扫描），调整辉度和聚焦旋钮使图形清晰、明亮。若有必要还应检查探极是否补偿合适，否则，要调整探极补偿电容。

② 根据需选择适合的输入耦合方式、垂直工作方式，根据工作方式的不同，选择相应的触发电源，如  $\text{CH}_1$  和  $\text{CH}_2$ 。

③ 调整“垂直移位”和“水平移位”旋钮使图形处于荧光屏中间位置。

④ 初步调整“偏转灵敏度”旋钮和“时基因数”旋钮使波形或亮带的幅度合适。

⑤ 调整“触发电平”旋钮直到触发指示灯亮，此时，一般可以得到稳定的波形。如果仍不稳定，选择与被测信号相对应的触发电源；或调节“偏转灵敏度”旋钮或改变探极的衰减比为 1:1。若调整触发电平后仍不稳定，可以试着变换触发耦合方式。经过上述调整后，一般能够得到稳定的波形。

⑥ 首先根据需继续调整偏“转灵敏度”或“时基因数”旋钮，得到幅度合适、宽度合适的波形。然后根据测量要求反复不断地继续调整有关的开关旋钮，直到得到符合要求的波形为止。最后按照要求对有关量进行测量。

要正确灵活地使用示波器，除了按要求进行不断调整之外，更重要的是要注意观察现象、分析问题、解决问题，并不断总结经验教训。

## 4.8 示波器的应用

示波器是时域测量仪器，可以用来显示信号波形，测量电压、频率、相位、时间、调制系数等参数。

### 4.8.1 测量电压

示波器可以测量直流电压、交流电压及交流电压瞬时值，其方法包括直接测量法和比较测量法。



## 1. 测量交流电压

### (1) 直接测量法

直接测量法又称为灵敏度变换法。测量时,将偏转灵敏度“微调”置于“校准(CAL)”位置后,选用合适的输入耦合方式,调节有关旋钮,使波形幅度合适、宽度适宜。设示波器偏转灵敏度、波形峰峰点间距离分别为  $S$  (单位为“V/DIV”)、 $H_{p-p}$  (单位为“DIV”),则有

$$\begin{aligned} U_{p-p} &= SH_{p-p} \\ U &= U_{p-p} / 2K_p \end{aligned} \quad (4-3)$$

式中,  $U_{p-p}$  为被测电压峰峰值, 单位为“V”;  $U$  为被测电压有效值, 单位为“V”;  $K_p$  为被测信号波峰因数。

如果探极衰减比(输入/输出)不为 1:1 或选用了“倍率”, 式(4-3)的计算结果乘以探极衰减比或除以倍率值后等于被测电压的最终结果。在直接测量直流电压时, 也应注意上述事项。

**【例 4-1】**示波器测量正弦波电压, 已知波形垂直幅度(即峰峰点距离)为 8DIV, 偏转灵敏度为 1V/DIV, 探极衰减比为 10:1, 试求正弦波电压有效值是多少? 如果正弦波改为三角波, 三角波电压有效值又是多少?

**解:** 由题意得,  $S=1\text{V/DIV}$ ,  $H_{p-p}=8\text{DIV}$ , 探极衰减比  $K=10:1$ , 所以

$$U_{p-p}=8\text{DIV}\times 1\text{V/DIV}=8\text{V}$$

输入正弦波时

$$\text{探极输出电压 } U' = U_{p-p} / 2K_p = 8\text{V} / 2\sqrt{2} = 2.83\text{V}$$

$$\text{正弦波电压 } U = 10 \times 2.83\text{V} = 28.3\text{V}$$

输入三角波时

$$\text{探极输出电压 } U'_\Delta = U_{p-p} / 2K_p = 8\text{V} / 2\sqrt{3} \approx 2.30\text{V}$$

$$\text{三角波电压 } U_\Delta = 10 \times 2.30\text{V} = 23.0\text{V}$$

答: (略)

### (2) 比较测量法(属于间接测量法)

比较法测量电压时, 首先调出合适的被测信号波形, 记录下波形峰峰点距离  $H_{p-p}$ ,  $H_{p-p}$  的单位为“DIV”, 然后保持“偏转灵敏度”及其“微调”旋钮不变, 加入大小(设峰峰值为  $U'_{p-p}$ , 单位为“V”)已知的标准信号, 记录下标准信号波形的峰峰点距离  $H'_{p-p}$ , 则有

$$U_{p-p} = \frac{U'_{p-p}}{H'_{p-p}} H_{p-p}$$

计算出  $U_{p-p}$  后, 利用式(4-3)计算出被测电压大小。

## 2. 测量直流电压

直流电压与交流电压的测量方法相似。其区别是: 选用 GND 耦合方式确定出时基线(自动扫描或连续扫描)在垂直方向上的位置后, 选用 DC 耦合方式将直流电压加到示波器上以确定出时基线产生垂直跳变的距离  $H$ , 直流电压的大小等于  $H$  与  $S$  的乘积。

根据时基线跳变的方向可以确定出直流电压的极性, 如果被测电压未被倒相, 则向上跳变时为正, 反之, 为负。



### 3. 测量含有直流成分的交流信号的大小

图 4.25 为含有直流成分的正弦交流电压波形，在测量时，既要测出直流成分的大小，又要测出交流电压的大小（振幅值）。

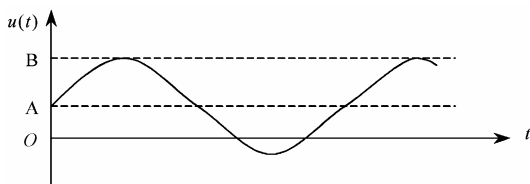


图 4.25 含有直流成分的正弦交流信号波形

#### 1) 测量交流电压振幅值

按照交流电压的上述测量方法进行测量，振幅值  $U_m = U_{p-p}/2$ 。

#### 2) 测量直流成分的大小

首先选用 AC 耦合方式，调整有关旋钮得到正弦电压的稳定波形，选正弦波形的正峰点（或负峰点）作为零电平假定位置；然后保持偏转灵敏度  $S$  及其微调旋钮不变，选用 DC 耦合方式得到发生跳变的波形，由此确定出正峰点（或负峰点）的跳变距离（设为  $H$ ），直流成分的大小等于  $H$  与  $S$  的乘积。

上述方法测量电压时，示波器工作于扫描方式。如果被测电压波形已知，也可在 X-Y 方式下测量电压大小。它的测量方法和步骤与上述方法相似，仅是现象上稍有区别，即交流电压加在 X（或 Y）端时，显示的是水平（或垂直）线段，线段长度等于  $H_{p-p}$ ；被测电压为直流电压时，显示的是亮点的跳变，跳变距离为  $H$ 。

## 4.8.2 测量时间

示波器测量时间的方法有多种，如直接测量法、比较测量法、时标法等，在此仅讨论直接测量法和时标法。

### 1. 直接测量法

直接测量法又称为标尺法，测量时，将“扫速微调”旋钮置于“校准”位置，选用合适的输入耦合方式，调节有关旋钮，使显示波形的幅度、宽度合适，记录下“时基因数 ( $t/\text{DIV}$ )”的大小（设为  $D_x$ ，单位为“s/DIV”）和波形某两点（根据被测量的定义来确定）之间的水平距离（设为  $L$ ，单位为“DIV”），则有

$$t = D_x L \quad (4-4)$$

式中， $t$  为被测时间量，单位为 s。

如果扫速扩展为  $K'$  时，被测时间量等于式 (4-4) 计算值的  $1/K'$ 。

一般情况下，在测量脉冲上升时间时，若不满足示波器上升时间  $t_r \leq t_{i2}/3$ ，应按式 (4-2) 加以修正。

**【例 4-2】** 已知示波器时基因数、偏转灵敏度分别为 5ms/DIV 和 2V/DIV，扫速扩展为 10，探极衰减比为 10:1，计算图 4.26 所示信号的周期是多少？电压是多少？

解：据题意得， $D_x = 5\text{ms}/\text{DIV}$ ， $S = 2\text{V}/\text{DIV}$ ， $H = 5\text{DIV}$ ，正弦波一个周期的宽度  $L = 8\text{DIV}$ ，扫速扩展  $K' = 10$ ，探极衰减比  $K = 10:1$ 。



正弦波周期  $T = D_x L / K' = 5\text{ms}/\text{DIV} \times 8\text{DIV}/10 = 4\text{ms}$

正弦波峰峰值  $U_{p-p} = SH = 2\text{V}/\text{DIV} \times 5\text{DIV} = 10\text{V}$

正弦波电压  $U = KU_{p-p}/2K_p = 10 \times 10\text{V}/2\sqrt{2} \approx 35.4\text{V}$

答：(略)

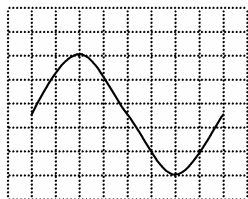


图 4.26 例 4-2 波形图

## 2. 时标法

时标法测量时间时，将高频信号加至 Z 轴输入端以对由 Y 轴输入端输入的低频信号波形进行亮度调制，得到由虚线段构成的低频信号波形，每一对亮、暗线段的对应时间等于高频信号的周期  $T_H$ 。为了使显示波形的线段不产生移动，要求高低频信号保持恒定的相位关系。为了使线段数量合适并能提高测量精确度，要求二者的频率比要合适。

根据被测时间量的定义，确定出被测低频信号时间段内的线段对数  $n$ ，被测时间量等于  $n$  与  $T_H$  的乘积。图 4.27 为时标法测量原理例图，可见，一个周期内  $n=4$ ，则正弦信号周期  $T_L = 4T_H$ 。

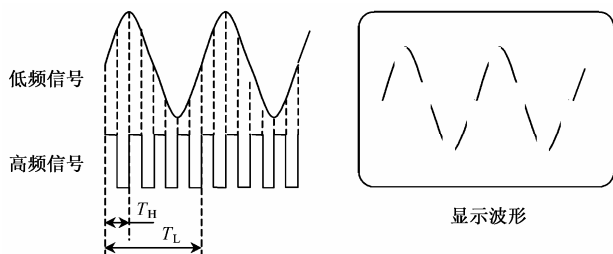


图 4.27 时标法测量原理例图

### 4.8.3 测量相位差

测量相位差是指测量两个同频信号的相位之差。测量方法有线性扫描法、椭圆法和圆扫描法等，在此仅讨论线性扫描法和椭圆法。

#### 1. 线性扫描法

线性扫描法即双踪法，测量时，将两个信号分别接入双踪示波器的两个输入端，选择触发信号源，采用交替显示（选用相位超前的信号作内触发信号源，否则，产生误差）或断续显示方式，适当调整“Y 轴移位”旋钮，使两个信号的水平中心轴重合，如图 4.28 所示，测出  $AB$  和  $AC$  长度，计算相位差

$$\Delta\varphi = \frac{AB}{AC} \times 360^\circ \quad (4-5)$$

式中， $AB$ 、 $AC$  的单位为  $\text{DIV}$ ； $\Delta\varphi$  为两个信号的相位差，单位为度“°”。

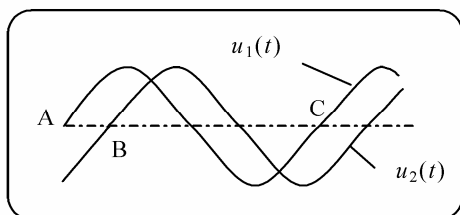


图 4.28 直线扫描法测量相位差

当示波器为单踪示波器时，选其中的一个被测信号作为外触发源，然后保持扫描速度不变，分两次将两个信号加到示波器上各得到图 4.28 所示的其中一个波形，依据式（4-5）计算即可。

## 2. 椭圆法

两个正弦信号分别加到示波器 X 和 Y 输入端时，两个信号在示波器 X 和 Y 偏转板间产生的电场对电子束共同作用而在荧光屏上得到图 4.29 所示的椭圆，图中 O 点为椭圆中心。椭圆形状与两信号的幅度和相位差有关。相位差计算如下：

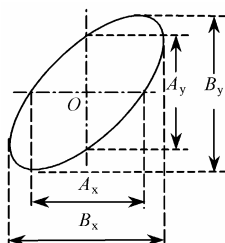


图 4.29 椭圆法测量相位差

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{A_y}{B_y} = \arcsin \frac{A_x}{B_x}$$

式中， $A_x$ （或  $A_y$ ）是横轴（或纵轴）与椭圆两交点的水平（或垂直）间距； $B_x$ （或  $B_y$ ）是两垂直（或水平）线与椭圆切点的水平（或垂直）间距。

### 4.8.4 测量频率

测量频率的方法有周期法、李沙育图形法和椭圆扫描法等，在此仅讨论周期法、李沙育图形法。

#### 1. 周期法

周期法测量时，根据周期、频率之间的关系，首先测量出周期，然后再换算出被测信号的频率。为了减小测量误差，可采用多个周期测量求平均值的方法测量周期。

**【例 4-3】**已知示波器时基系数为  $2\text{ms}/\text{DIV}$ ，扫速扩展为 10，求图 4.30 所示的被测信号的频率是多少？

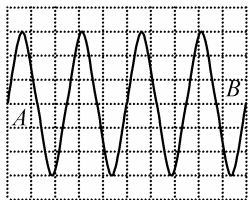


图 4.30 例 4-3 的波形图

**解：**利用多周期测量法，据题意得，四个周期宽度  $L=10\text{DIV}$ ，时基因数  $D_x=2\text{ms/DIV}$ ，扫速扩展  $K'=10$ 。

被测信号周期为  $T = LD_x / 4K' = 10\text{div} \times 2\text{ms/div} / 4 \times 10 = 0.5\text{ms}$

被测信号频率为  $f=1/T=1/0.5\text{ms}=2\text{kHz}$

答：（略）

## 2. 李沙育图形法

李沙育图形法测量频率时，示波器工作于 X-Y 方式下，频率已知的信号与频率未知的信号加到示波器的两个输入端，调节已知信号的频率，使荧光屏上得到李沙育图形，由此可测出被测信号的频率。

示波器工作于 X-Y 方式时，X 和 Y 两信号对电子束的作用时间总是相等的，而且 X 和 Y 信号分别确定的是电子束水平、垂直方向的位移，所以信号频率越高，波形经过垂直线和水平线的次数越多（如正弦波每个周期经过两次），即垂直线、水平线与李沙育图形的交点数分别与 X 和 Y 信号频率成正比。因此，李沙育图形存在关系：

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_H}{N_V} \quad (4-6)$$

式中， $N_H$  和  $N_V$  分别为水平线、垂直线与李沙育图形的交点数； $f_y$ 、 $f_x$  分别为示波器 Y 和 X 信号的频率。

**【例 4-4】**如图 4.31 所示的李沙育图形，已知 X 信号频率为 6MHz，问 Y 信号的频率是多少？

**解：**分别在李沙育图形上画出垂直线和水平线，则  $N_H=2$ ， $N_V=6$ 。注意必须在交点数最多的位置画线。由式（4-6）得

$$f_y = f_x \frac{N_H}{N_V} = 6\text{MHz} \times \frac{2}{6} = 2\text{MHz}$$

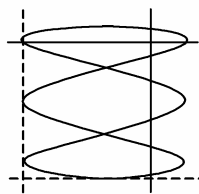


图 4.31 例 4-4 李沙育图形

答：（略）

李沙育图形法适合测量频率比在 1:10 至 10:1 之间的信号，否则波形显示复杂，难以确定交点数。

## 4.8.5 测量调幅系数

示波器还可以用来测量调频系数和调幅系数，在此仅讨论调幅系数的测量。调幅系数的测量方法有直线扫描法、梯形图法和椭圆法等三种。





## 1. 直线扫描法

直线扫描法测量调幅系数时,将被测信号加到示波器 Y 轴输入端,调整示波器有关开关旋钮,得到如图 4.32 所示的调幅波波形,测出  $A$ 、 $B$  长度,代入式 (4-7) 计算得出调幅系数。

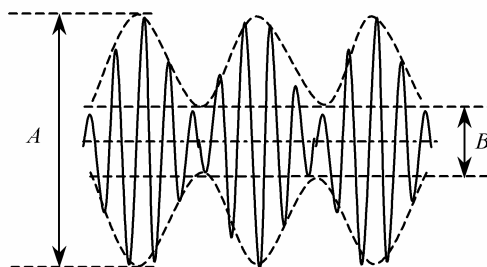


图 4.32 直线扫描法测量调幅系数

$$m_a = \frac{A-B}{A+B} \times 100\% \quad (4-7)$$

## 2. 梯形图法

梯形图法测量调幅系数时,示波器工作于 X-Y 方式,将调制信号、调幅波分别加至示波器 X 和 Y 轴输入端,在荧光屏上显示如图 4.33 所示的梯形图,测出  $A$ 、 $B$  长度,利用式 (4-7) 计算即可。

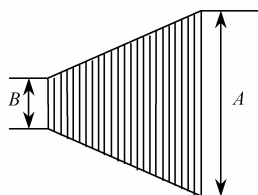


图 4.33 梯形图法测量调幅系数

## 3. 椭圆法

椭圆法是将被测已调波电压用  $RC$  移相电路移相后加至示波器 X-Y 方式下的 X、Y 输入端,得到如图 4.34 所示的图形,测出  $A$ 、 $B$  长度,利用式 (4-7) 计算即可。

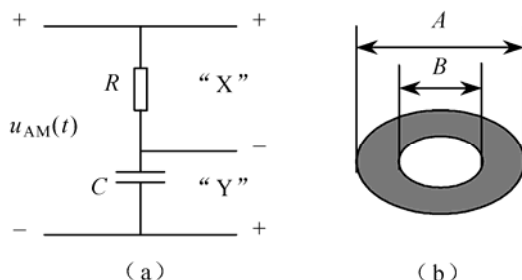


图 4.34 椭圆法测量调幅系数



## 4.9 取样示波器

由于受到垂直放大器通频带、扫描速度、图像亮度等各种因素的影响,通用示波器一般不能观测 100MHz 以上的高频或超高频信号。为了观测高频信号,在普通示波器的前面加一个专门的取样装置,运用取样技术把高频信号变成波形与之相似的低频或中频信号,然后在荧光屏上以断续的亮点显示出被测信号的波形来,这样就构成了取样示波器。取样示波器可以观测吉赫兹以上的超高频信号。

### 4.9.1 工作原理

取样示波器与普通示波器的主要区别在于前者运用了取样技术。取样技术的实质是频率变换技术,基本的取样方式(又称为顺序取样)有实时取样与非实时取样两种方式。测量高频信号应采用非实时取样技术。

#### 1. 实时取样与非实时取样

对一个连续时间输入信号  $u_i(t)$  的取样过程如图 4.35 所示。在取样脉冲  $p(t)$  到来时,取样门(电子开关 S)接通,对输入信号  $u_i(t)$  进行一次取样,即取得输入信号  $u_i(t)$  一个样点的值;取样脉冲过后取样门断开。取样门输出的离散信号称为样品信号(或取样信号)  $u_s(t)$ 。如果取样脉冲  $p(t)$  的宽度  $\tau$  足够窄,样品信号的幅度就是该次取样时刻输入信号的瞬时值。而且,取样脉冲  $p(t)$  的周期  $T'$  字距大小,单位时间内的样点数就越多。当取样点的数目足够多时,样品信号的包络就是输入信号  $u_i(t)$  的波形。

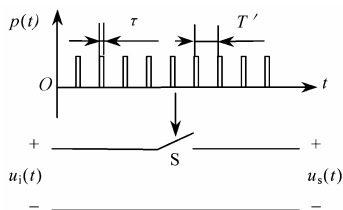


图 4.35 取样原理

#### (1) 实时取样

如果输入信号  $u_i(t)$  的周期为  $T$ , 取样脉冲的周期为  $T' < T$ , 并且取样持续的时间等于输入信号的一个周期或输入信号实际经历的时间, 这种取样方式称为实时取样。显然, 由于实时取样信号的频率比输入信号的频率还要高。所以实时取样不能用于高频信号的观测而常用于非周期现象和单次过程的观测。

#### (2) 非实时取样

取样点分别来自输入信号若干周期的取样方式称为非实时取样, 即跨周期取样, 如图 4.36 所示。如果输入信号  $u_i(t)$  的周期为  $T$ , 取样脉冲的周期应为  $T' = mT + \Delta t$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ), 图中取  $m=1$ 。非实时取样工作过程是: 在  $t_1$  时刻, 进行第一次取样, 对应于波形的点 1; 经过  $T + \Delta t$  后的  $t_2$  时刻, 进行第二次取样, 取样点为波形的点 2, 但取样脉冲相对于信号周期延迟  $\Delta t$ ; 第三次则延迟  $2\Delta t$ ;  $\dots$ 。依此类推, 每间隔  $mT + \Delta t$  在波形上取一个样点。样品信号  $u_s(t)$  的幅度等于输入信号  $u_i(t)$  的瞬时值, 宽度等于  $\tau$ ;  $u_s(t)$  虽然是一串脉冲序列, 但  $u_s(t)$  的包络同



样能够重现  $u_i(t)$  的波形； $u_s(t)$  经延长电路展宽后得到阶梯波  $u_y(t)$ 。当取  $m \gg 1$  时，就可以将超高频信号变成低频信号，然后用通用示波器进行显示。

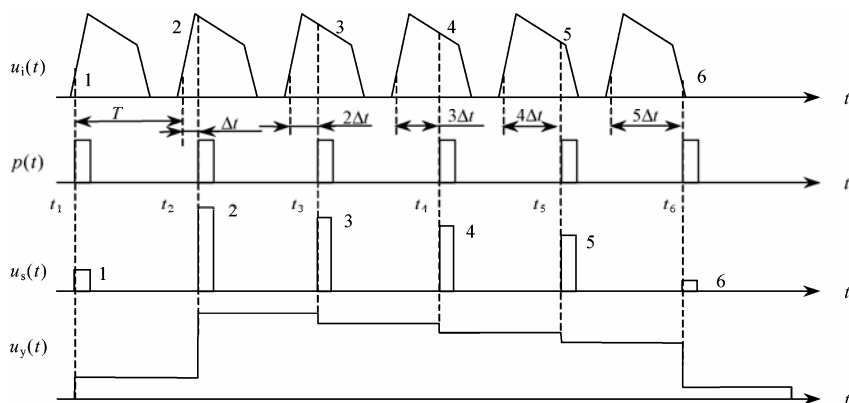


图 4.36 非实时取样过程

## 2. 取样示波器的波形合成

取样示波器两对偏转板上均加阶梯波，如图 4.37 所示。由于阶梯波  $u_y(t)$  被加至 Y 偏转板，每取样一次阶梯上升一级、每一级持续时间为  $mT + \Delta t$  的阶梯扫描电压  $u_x(t)$  加至 X 偏转板，从而在荧光屏上得到许多单个的亮点。每个亮点的高度反映出样品信号  $u_s(t)$  的幅度，众多亮点即构成被测信号  $u_i(t)$  的波形。

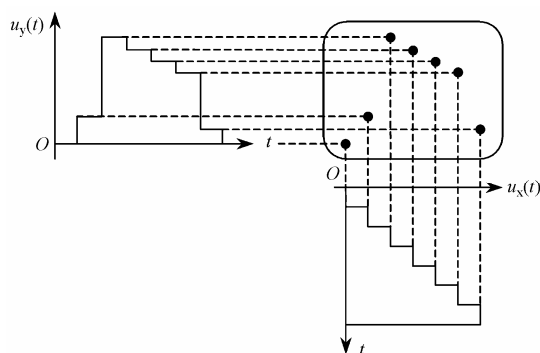


图 4.37 取样示波器的波形合成

## 4.9.2 组成

取样示波器主要由主机、Y 通道和 X 通道三大部分组成，如图 4.38 所示。主机部分与通用示波器的相同。

Y 通道的作用是在取样脉冲的作用下，把超高频信号变为低频信号。Y 通道由取样电路、放大电路及延长电路组成。取样电路由取样门和取样脉冲发生器组成。延长电路由延长门、延长门脉冲信号源组成。取样门平时关闭，只有取样脉冲到来时才打开取出样品信号。延长电路把每个样品信号幅度记录下来并展宽，供最后信号合成之用。延长电路的输出接至通用示波器的 Y 偏转板。

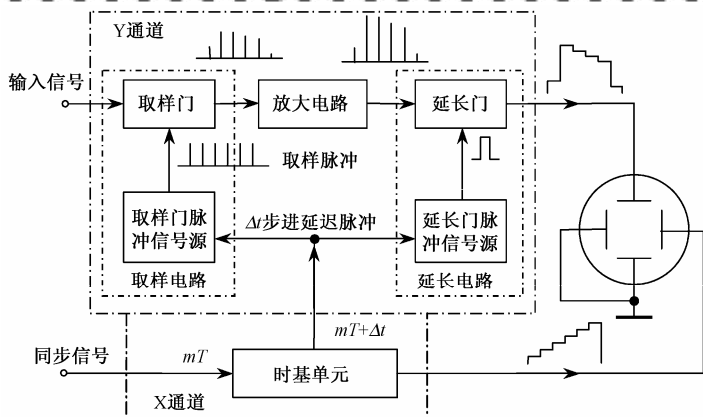


图 4.38 取样示波器组成框图

X 通道的主要作用是产生时基扫描电压,同时产生 $\Delta t$ 步进延迟脉冲送 Y 通道,控制取样门脉冲信号源和延长门脉冲信号源的工作。利用同步分频方法改变  $m$  的大小可扩展测量频率上限。

取样示波器与通用示波器的区别主要有:

① 取样示波器延迟级放在取样门前面,以便在内触发时提前提取一部分被测信号作为触发信号。

② 取样示波器 X 通道利用每一个 $\Delta t$ 步进延迟脉冲触发阶梯波形成电路得到扫描电压,扫描电压是线性阶梯波。由于 $\Delta t$ 步进延迟脉冲的作用,扫描电压与取样脉冲是同步的。

③ 通用示波器中,每触发一次能产生一个完整扫描信号。因为取样示波器中的扫描电压是阶梯波,所以取样示波器中每触发一次只能获得一个样点。

④ 取样示波器显示的波形由许多点组成,它能反映被测信号形状,但它是经过变换得到的,波形经历的时间远大于被测信号的实际经历时间。故取样示波器只能测量频率较高的重复信号,而不能对单次脉冲和极低频信号进行观测。

### 4.9.3 主要性能指标

取样示波器除具有通用示波器的性能指标外,还具有以下指标:

#### (1) 取样密度

取样密度表示荧光屏在水平方向上单位长度内的亮点个数,取样密度太低,显示波形将产生闪烁。

#### (2) 等效扫描速度

通用示波器扫描速度指单位时间内电子束在水平方向的位移。而对取样示波器,假设信号波形由  $n$  个取样点组成,则信号实际经历的时间为  $n\Delta t$ 。等效扫描速度为  $n\Delta t/L$ ,  $L$  表示扫描线长度,由于电子束扫描整个荧光屏的时间与显示波形代表的时间不同,所以用“等效”来表示区别。

#### (3) 取样频率

取样频率即取样脉冲的重复频率。取样频率越高,越能反映被测信号特性。



## 4.10 数字存储示波器

具有记忆存储功能的示波器包括模拟存储示波器（TSO，Tube Storage Oscilloscope）和数字存储示波器（DSO，Digital Storage Oscilloscope）两种。前者利用记忆示波管进行存储，已很少使用。后者利用数字存储技术进行存储，使用比较普遍。本节重点介绍数字存储示波器的工作原理及工作方式。

### 4.10.1 工作原理

图 4.39 所示为数字存储示波器的组成框图。数字存储示波器利用 A/D 变换器将输入的模拟信号变换成数字信号，然后存储于数字存储器中，需要时再将存储器中存储的内容调出（读出），通过相应的 D/A 变换器，再将数字信号恢复为模拟信号，显示在示波管荧光屏上。在数字存储示波器中，信号处理功能和信号显示功能是分开的。其性能指标主要取决于进行信号处理的 A/D 和 D/A 变换器和数字存储器。

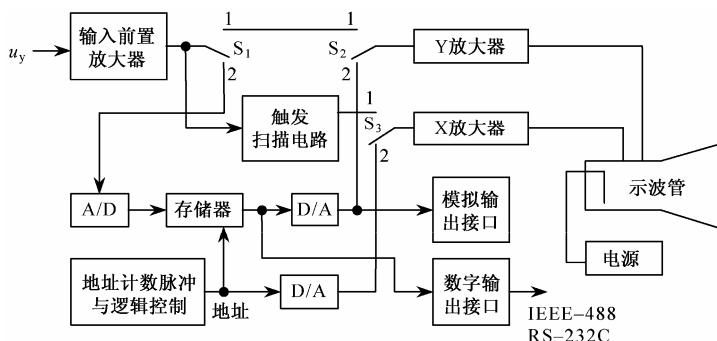


图 4.39 数字存储示波器基本框图

当开关  $S_1$ 、 $S_2$  打在位置 1 时，接通模拟信号显示方式，示波器与普通示波器工作原理相同。当  $S_1$ 、 $S_2$  打在位置 2 时，接通数字存储工作方式，输入的被测信号通过 A/D 变换器变成数字信号，由地址计数脉冲选通存储器的存储地址并将该数字信号存入存储器。存储器中的信息每 256 个单元组成一页，即一个地址页面。当显示信息时，给出页面地址，地址计数器则从该页面的 0 号单元开始，读出数字信息送到 D/A 变换器变换成模拟信号送往垂直放大器进行显示。同时，地址信号也经过 X 方向 D/A 变换器送入水平放大器，以控制 Y 方向信号显示的水平位置。

数字存储示波器的工作过程如图 4.40 所示。当被测信号输入时，首先对模拟量进行实时取样，实时取样是对一个周期内信号的不同点的取样，它与取样示波器的跨周期取样是不同的，图 4.40 (a) 中的  $a_0 \sim a_7$  点即对应于被测信号  $u_y$  的 8 个取样点。8 个取样点得到的数字量（即二进制数字 0 和 1 数列） $D_0 \sim D_7$  分别存储于地址号为 00H~07H 的 8 个存储单元中。在显示时，取出  $D_0 \sim D_7$  数据，进行 D/A 变换，同时存储单元地址号 00H~07H 也经过 D/A 变换形成图 4.40 (d) 所示的阶梯波，阶梯波加到 X 水平系统控制扫描电压，最终将被测波形  $u_y$  重现于荧光屏上，如图 4.40 (e) 所示，只要 X 方向和 Y 方向的量化程度足够精细，图 4.40 (e) 的波形即能够准确代表图 4.40 (a) 所示的被测波形。



将数字存储技术和 CPU 微处理器用于取样示波器，可以构成存储取样示波器。

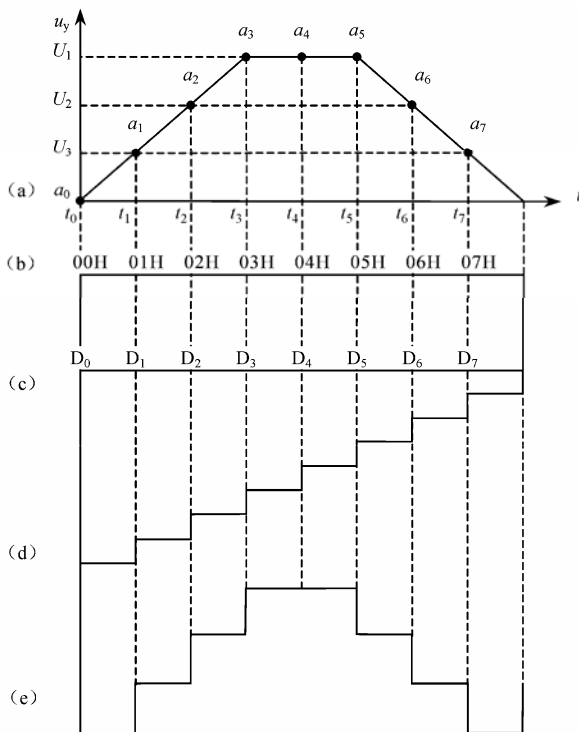


图 4.40 存储器工作过程

## 4.10.2 工作方式

### 1. 数字存储器的功能

数字存储示波器的随机存储器 RAM 包括信号数据存储、参考波形存储、测量数据存储和显示缓冲存储四种。信号数据存储存放模拟信号取样数据。参考波形存储存放参考波形的数据，所存储的内容一般由信号数据存储调出来，大多采用电池供电，故可以长期保存数据。测量数据存储存放测量与计算的中间数据和计算结果，和一般微机化仪器的随机存储器作用基本相同。显示缓冲存储存放欲显示的数据，荧光屏上显示的全部信息均由显示缓冲存储器直接提供。

### 2. 触发工作方式

数字存储示波器的触发包括常态触发和预置触发两种方式。

#### (1) 常态触发

常态触发是在存储工作方式下自动形成的，同模拟示波器基本一样，可通过面板设置触发电平的幅度和极性，触发点可处于复现波形的任何位置及存储波形的末端。触发点位置通常用加亮的亮点来表示。

#### (2) 预置触发

预置触发即延时触发，是人为设置触发点在复现波形上的位置，它是在进行预置之后通过微处理器的控制和计算功能来实现的。由于触发点位置不同，可以观测到触发点前后不同



时间段的波形，这是因为数字存储示波器的触发点只是一个存储的参考点，而不一定是取样、存储的第一点。预置触发对显示数据的选择带来了很大的灵活性。

### 3. 测量与计算工作方式

数字存储示波器对波形参数的测量分为自动测量和手动测量两种。一般参数的测量为自动测量，即示波器自动完成测量工作，并将测量结果以数字形式显示在荧光屏上。特殊值的测量使用手动光标进行测量，即光标测量。光标测量指的是在荧光屏上设置两条水平光标线和两条垂直光标线，这四条光标线可在面板按键的控制下移动，光标与波形的交点对应于信号存储器中的相应数据。测量时，示波器在测量程序控制下，根据光标位置来完成测量，并将测量结果以数字形式显示在荧光屏上。

### 4. 面板键操作方式

数字存储示波器的面板按键分为立即执行键和菜单键两种。按下立即执行键后，示波器立即执行该项操作。当按下菜单键时，在屏幕下方显示一排菜单，然后按菜单中所对应的软键执行菜单中该项目的操作。

#### 4.10.3 显示方式

数字存储示波器的显示方式通常有以下几种：

##### 1. 存储显示

存储显示方式是数字存储示波器的基本显示方式，适于一般信号的观测。在一次触发形成并完成信号数据的存储后，经过显示前的缓冲存储，并控制缓冲存储器的地址顺序，依次将欲显示的数据读出并进行 D/A 变换，然后将信号稳定地显示在荧光屏上。

##### 2. 抹迹显示

抹迹显示方式适于观测一长串波形中在一定条件下才会发生的瞬态信号。抹迹显示时，应先根据预期的瞬态信号设置触发电平和极性。观测开始后仪器工作在末端触发和预置触发相结合的方式下，当信号数据存储器被装满但瞬态信号未出现时，实现末端触发，在荧光屏上显示一个画面，保持一段时间后，被新存入的数据更新。若瞬态信号仍未出现，再利用末端触发显示一个画面。这样一个个画面显示下去，如同为了查找某个内容一页页地翻书一样，一旦出现预期的瞬态信号则立即实现预置触发，将捕捉到的瞬态信号波形稳定地显示在荧光屏上，并存入参考波形存储器中。

##### 3. 卷动显示

卷动显示方式适于观测缓变信号中随机出现的突发信号，它包括两种方式。

一种是用新波形逐渐代替旧波形，变化点自左向右移动，如图 4.41 (a) 所示。另一种是波形从右端推出向左移动，在左端消失，如图 4.41 (b) 所示。当异常波形出现时，可按下存储键，将此波形存储在荧光屏上或存入参考波形存储器中，以便作更细致的观测与分析。

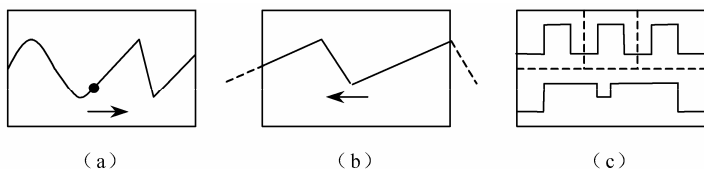


图 4.41 卷动显示方式和延迟扫描放大显示方式

#### 4. 放大显示

放大显示方式适于观测信号波形细节,此方式是利用延迟扫描方法实现的,如图 4.41 (c) 所示。此时荧光屏一分为二,上半部分显示原波形,下半部分显示放大的部分,其放大位置可用光标控制,放大比例也可调节,还可以用光标测量放大部分的参数。

#### 5. X-Y 显示

X-Y 显示方式与通用示波器的显示方法基本相同,一般用于显示李沙育图形,此处不作详述。



### 本章小结

本章主要介绍了通用电子示波器的基本组成、工作原理及其应用。

(1) 阴极射线示波管由电子枪、偏转板和荧光屏三部分组成。电子示波器测量各种物理量的原理依据是示波管的线性偏转特性。示波器扫描过程分为扫描正程、扫描逆程、扫描等待三个过程。扫描正程时显示波形;扫描逆程和扫描等待时,电子束回到起始点,要对回扫线和休止线消隐。示波器得到稳定波形的条件是扫描电压的周期等于被测信号周期的整数倍。

(2) 示波器的扫描方式分为连续扫描、触发扫描和单次扫描三大类,基本的扫描方式是连续扫描和触发扫描。示波器一般采用触发扫描方式。自动扫描时连续扫描和触发扫描可以自动变换。

(3) 示波器主要由 X、Y 通道及主机部分组成。选用示波器要对其频带宽度  $BW$ 、上升时间  $t_r$  等性能指标进行综合考虑。示波器可以用来观测信号波形,测量电压、频率、相位差、时间、调制系数等。

(4) 运用取样技术把高频信号变成波形与之相似的低频或中频信号后,进行波形显示的示波器为取样示波器,它可以观测吉赫兹以上的超高频信号。

(5) 取样示波器取样技术的实质是频率变换,它的取样方式有实时取样与非实时取样两种方式。测量高频信号应采用非实时取样技术。

(6) 取样示波器主要由主机、Y 通道和 X 通道三部分组成。

(7) 数字存储示波器采用数字电路,将输入的模拟信号先经 A/D 变换器变换成数字信息,存储于数字存储器中,需要显示时,再从存储器中读出,通过 D/A 变换器将数字信息变换成模拟信号显示在荧光屏上。

(8) 将数字存储技术和 CPU 微处理器用于取样示波器,可以构成存储取样示波器。

(9) 数字存储示波器的触发包括常态触发和预置触发两种方式。

(10) 数字存储示波器的显示方式包括存储显示方式、抹迹显示、卷动显示、放大显示及 X-Y 显示五种方式。





## 习题 4

1. 示波器得到稳定波形的条件是什么? 简述示波器波形显示原理。
2. 示波器线性扫描方式有哪些? 怎样实现? 请根据扫描电路的构成说明实现的方法。
3. 内触发信号可以在延迟线后引出吗? 为什么?
4. 双踪显示方式有哪几种? 交替显示和断续显示各适于测试哪种信号? 为什么?
5. 如何判断探极补偿电容补偿正确? 如果不正确怎样进行调整?
6. 示波器观测正弦波时得到图 4.42 所示的波形, 已知信号连接正确、示波器工作正常, 试分析产生的原因, 并说明如何调节有关的开关旋钮, 才能正常地显示波形。

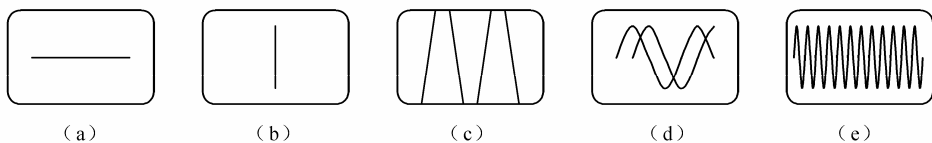


图 4.42 习题 6 波形图

7. 示波器时间因数、偏转灵敏度分别为  $0.5\text{ms}/\text{DIV}$  和  $10\text{mV}/\text{DIV}$ , 试分别绘出下列被测信号的波形。(1) 方波, 频率为  $500\text{Hz}$ , 峰峰值为  $20\text{mV}$ ; (2) 正弦波, 频率为  $1000\text{Hz}$ 、峰峰值为  $40\text{mV}$ 。
8. 设连续扫描电压的扫描正程是扫描逆程的 4 倍 (不考虑扫描等待时间), 要显示出频率为  $2\text{kHz}$  的正弦波 4 个周期的波形, 请问连续扫描电压的频率是多少?
9. 如果被测正弦波信号频率为  $10\text{kHz}$ , 理想的连续扫描电压频率为  $4\text{kHz}$ , 试绘出荧光屏上显示出的波形。
10. 已知扫描电压正程、逆程时间分别为  $3\text{ms}$  和  $1\text{ms}$ , 且扫描逆程不消隐, 试绘出荧光屏上显示出的频率为  $1\text{kHz}$  正弦波的波形图。
11. 已知示波器 Y 偏转灵敏度为  $1\text{mV}/\text{DIV}$ , 探极衰减系数为  $10:1$ , 得到总高度为  $7.07\text{DIV}$  的正弦波, 请问正弦波的有效值是多少?
12. 已知示波器 Y 偏转灵敏度为  $10\text{mV}/\text{DIV}$ , 时基因数为  $0.2\text{ms}/\text{DIV}$ , 探极衰减比为  $10:1$ , 正弦波频率为  $1000\text{Hz}$ , 峰峰值为  $0.5\text{V}$ , 试绘出显示出的正弦波的波形图。如果正弦波有效值为  $0.2\text{V}$ , 重绘显示出的正弦波波形图。
13. 已知示波器最小时基因数为  $0.01\mu\text{s}/\text{DIV}$ , 荧光屏水平方向有效尺寸为  $10\text{DIV}$ , 如果要观察两个周期的波形, 问示波器最高扫描工作频率是多少? 示波器可以显示被测信号的最高频率是多少? (不考虑扫描逆程、扫描等待时间)
14. 题 4.13 中, 将最小时基因数改为最大时基因数为  $5\text{ms}/\text{DIV}$ , 问示波器最低工作频率是多少? 示波器可以显示被测信号的最低频率是多少?
15. 试分析图 4.43 所示显示下列波形的原因, 已知图 4.43 (a) 图的输入为梯形波, X、Y 通道正常; 图 4.43 (b) 中的输入为正弦波, Y 通道工作正常, X 通道有故障。

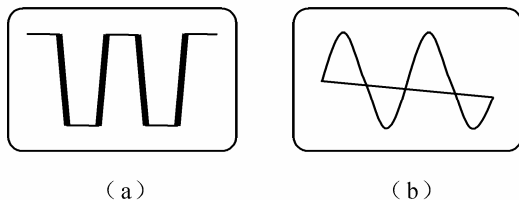


图 4.43 习题 15 波形图

16. 图 4.44 所示为示波器显示的波形，试根据显示出的波形判断示波器触发电平和触发极性各是怎样的？

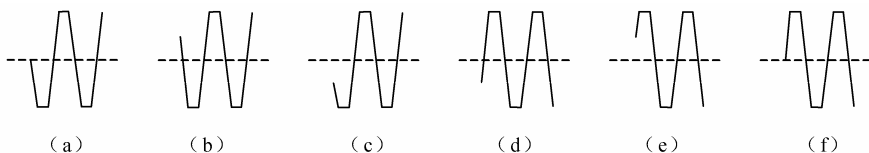


图 4.44 习题 16 波形图

17. 双踪示波器测量相位差，显示波形如图 4.45 所示，测得  $AB=2\text{DIV}$ ， $AC=24\text{DIV}$ ，试求两个波形的相位差  $\Delta\varphi$ 。

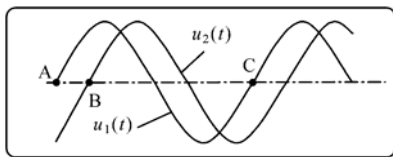


图 4.45 习题 17 波形图

18. 已知示波器时基系数为  $1\text{ms}/\text{DIV}$ ，偏转灵敏度为  $0.5\text{V}/\text{DIV}$ ，探极衰减系数为  $10:1$ ，显示波形如图 4.46 所示，试求被测正弦波的有效值、周期和频率各是多少？

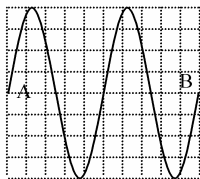


图 4.46 习题 18 波形图

19. 已知被测脉冲上升时间约为  $9\text{ns}$ ，试估算所选示波器的频带宽度应至少为多少？（提示：该题需忽略示波器上升时间的影响）

20. 数字存储示波器的工作原理是怎样的？试结合图 4.36 说明它的工作过程。

21. 结合图 4.21 说明双扫描显示的工作原理双扫描显示方式有几种？

# 第 5 章 频域测量与仪器

学习参考：频域测量仪器包括扫频仪、频谱仪等，主要用于测量频率特性曲线、频谱特性曲线。要求通过学习掌握仪器的基本组成原理、了解它们的使用方法。

本章要点：扫频仪、频谱仪的组成原理与性能指标及应用。

## 5.1 扫频仪的工作原理与主要性能指标

### 5.1.1 频率特性测量方法

扫频仪是频率特性测试仪的简称，是一种能在荧光屏上直接观测到各种电路频率特性曲线等的频域测量仪器，由此可以测算出被测电路频带宽度、品质因数、电压增益、输入输出阻抗及传输线特性阻抗等参数。扫频仪与示波器的区别在于前者能够自身提供测试时所需要的信号源，并将测试结果以曲线形式显示在荧光屏上。

被测电路的频率特性曲线即幅频特性曲线，其测量方法包括点频测量法和扫频测量法。

① 点频测量法即静态测量法，由人工逐次改变输入正弦信号的频率，逐点记录对应频率的输出信号幅度而得到幅频特性曲线。该方法繁琐、费时、不直观、测量误差大。

② 扫频测量法即动态测量法，它是利用扫频仪对频率特性曲线进行测量的方法。该方法操作方便、显示直观，且无测试频率的断点。

### 5.1.2 扫频仪工作原理

扫频仪是在示波器 X-Y 方式的基础上，增加扫描信号源、扫频信号源、检波探头等组成的，如图 5.1 (a) 所示。

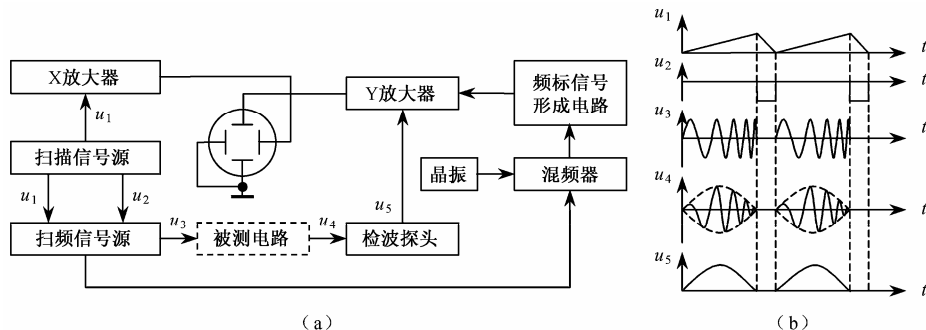


图 5.1 扫频仪的基本组成框图及工作波形



### (1) 扫描信号源

扫描信号源用于产生扫描电压  $u_1$  和扫频起停控制信号  $u_2$ 。 $u_1$  除用于示波器水平扫描外，还是扫频信号  $u_3$  的频率调制信号。实用扫频仪常用 50Hz 正弦波作  $u_1$ 。

$u_2$  用于控制扫频信号源在示波器扫描正程时振荡，以在荧光屏上得到幅频特性曲线；在扫描回程时使扫频信号源停止振荡，以在荧光屏上得到一条水平基线，该水平基线正好用作被测频率特性曲线的参考基线（零值线）以利于观测，如图 5.2 (a) 所示。若无扫频起停控制信号  $u_2$ ，由于变压器磁心等磁滞材料的磁滞效应，当  $u_1$  由大变小，即由扫描正程变为回程时，扫频信号的瞬时振荡频率将不再沿原来的曲线减小，而是沿新的曲线减小，故在荧光屏上得到的是完全不重合的两条频率特性曲线，给观测带来不便，如图 5.2 (b) 所示。

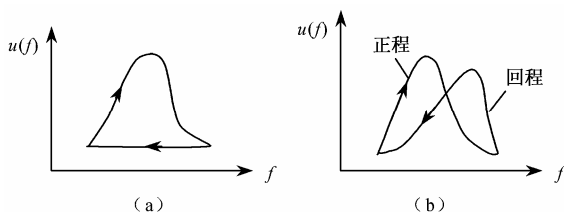


图 5.2 不同情况下，扫频仪显示的图形

### (2) 扫频信号源

扫频信号源即频率受控振荡器，用于在  $u_1$ 、 $u_2$  控制下产生频率随  $u_1$  电压增大而升高的扫频信号  $u_3$ ，并把  $u_3$  输出给被测电路。

由于示波管电子束的水平偏移与  $u_1$  的大小成正比，而  $u_1$  与  $u_3$  的瞬时频率具有一一对应关系，故示波器 X 轴相应地成为频率坐标轴，在荧光屏上的每一水平位置从左向右频率线性升高。扫频仪的工作波形如图 5.1 (b) 所示。

### (3) 检波探头

由于被测电路的频率特性不同，被测电路输出信号的幅度会随  $u_3$  频率的升高而产生变化。检波探头用于对该变化进行峰值检波，并将检波输出信号送往 Y 放大器，该信号的幅度变化反映的是被测电路的幅频特性，因而在荧光屏上能直接观察到被测电路的幅频特性曲线。

### (4) 频标产生电路

频标信号形成电路、混频器与晶振等构成频标产生电路，用于产生进行频率标度的频标信号，以便读出各点对应的频率值。

### (5) Y 放大器

Y 放大器用于对检波输出信号进行放大、处理，它的输出被送至示波管 Y 偏转系统，使幅频特性曲线得以在荧光屏的垂直方向上显示出来，其放大量由面板上的 Y 增益电位器控制。

## 5.1.3 产生扫频信号的方法

产生扫频信号的方法很多，有磁调电感法、YIG (Yttrium Iron Garnet, 钇铁石榴石) 谐振法、变容二极管法等方法，比较常用的是变容二极管法。

图 5.3 所示为变容二极管法扫频振荡器原理图，其中由  $VT_1$  等组成电容三点式振荡器，变容二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  与  $L_1L_2$  及  $VT_1$  的结电容组成振荡回路， $C_1$  为隔直电容， $L_3$  为高频扼流圈。调制信号经  $L_3$  同时加至变容管  $VD_1$  和  $VD_2$  的两端，当调制电压随时间作周期性变化时，



$VD_1$  和  $VD_2$  结电容的容量也随之变化, 从而使振荡器产生扫频信号。

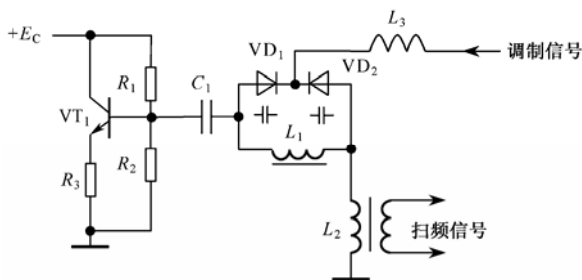


图 5.3 变容二极管法扫频振荡器原理图

### 5.1.4 频标产生电路

扫频仪采用在幅频特性曲线上叠加频标的方法进行频率标度, 包括菱形频标和针形频标两种, 一般由差频电路产生。

#### 1. 菱形频标

图 5.4 (a) 所示为菱形频标产生原理图, 它对扫频信号与标准信号的基波、谐波进行混频而得到“零差频”的菱形频标, 如图 5.4 (b) 所示。设标准信号频率为  $f_s$ , 则谐波信号源输出信号频率为基波  $f_s$  及各次谐波  $f_{s1}$ 、 $f_{s2}$ 、 $f_{s3}$ 、 $f_{s4}$ 、 $f_{s5}$ …。扫频信号与谐波信号源输出信号经混频器混频后, 再经低通滤波输出差频信号, 由此得到一系列零差频点。例如在  $f=f_{s1}$  处差频为零, 而  $f$  在  $f_{s1}$  点附近差频越来越大, 由于低通滤波器的选通性, 在靠近零差频点的幅度最大, 两边信号幅度迅速衰减, 于是在  $f=f_{s1}$  处形成“菱形频标”。同理, 在  $f=f_{s2}$ 、 $f=f_{s3}$ …处也形成菱形频标。菱形频标与幅频特性曲线叠加便出现图 5.4 (b) 所示的图形, 配合标准信号源可读出频标的频率值。改变标准信号源的频率, 菱形频标的位置将相应移动, 外接频标亦按上述原理工作。

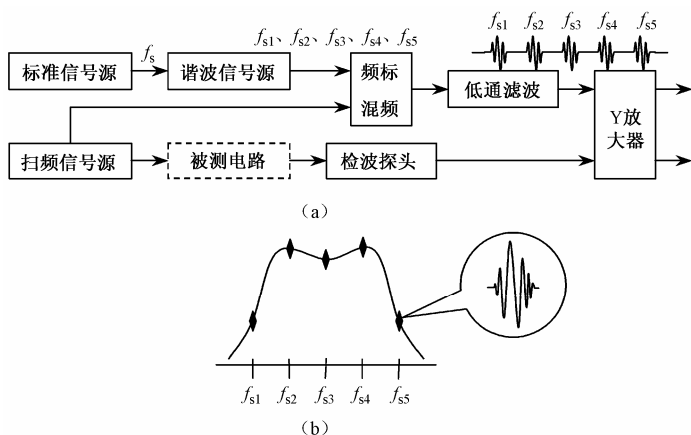


图 5.4 菱形频标产生原理

菱形频标是由低通滤波器对差频信号的选择性而形成的, 其选择性不可能无限高, 故菱形频标总要占有一定的宽度, 只有在特性曲线上占有的宽度相对较窄时, 才能形成相对很细



的可分辨的频标, 否则频标相互靠近、连接、甚至局部叠加, 难以确定频率值。故菱形频标适于高频测量。

BT-3C 型频率特性测试仪采用差频法产生菱形频标, 为了提高频标的准确度, 采用频率分别为 1MHz 和 10MHz 的晶体振荡器产生菱形频标。

当测量宽频带电路时, 需要在被测频率特性曲线上出现具有单位频率间隔的一系列频标 (即频率标尺), 该标尺通常以十进制形式标度。该标尺的形成以差频方法为基础, 通过增加谐波发生器, 使标准信号源输出的 1MHz (或 10MHz) 信号经谐波发生器后产生 1MHz, 2 MHz, 3 MHz... 等一系列倍频信号, 每当扫频信号频率扫经上述任一频率时, 都要产生差频信号, 形成一系列菱形频标。

## 2. 针形频标

在低频扫频仪中常用针形频标, 其产生方法与菱形频标相似, 针形频标的工作原理是: 利用菱形差频信号触发单稳触发器, 使之输出一窄脉冲, 窄脉冲经整形后再与幅频特性曲线在 Y 放大器中叠加, 最后出现在幅频特性曲线上。窄脉冲的宽度可由单稳触发器调节得很窄, 所以产生的频标形似细针, 称之为针形频标, 适用于低频测量, 例如, BT-4 型低频频率特性测试仪即采用针形频标。

### 5.1.5 扫频仪的主要性能指标

扫频信号源是扫频仪的主要组成部分, 二者的主要性能指标是一致的, 内容如下:

#### 1. 有效扫频宽度和中心频率

有效扫频宽度是指在扫频线性和振幅平稳性能符合要求的前提下, 一次扫频能达到的最大频率覆盖范围, 即

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$$

式中,  $\Delta f$  为有效扫频宽度;  $f_{\max}$  为扫频最高频率;  $f_{\min}$  为扫频最低频率。

扫频信号中心频率是指扫频信号从低频到高频之间中心位置的频率, 定义式为

$$f_0 = (f_{\max} + f_{\min}) / 2$$

相对扫频宽度定义为有效扫频宽度与中心频率之比, 即

$$\frac{\Delta f}{f_0} = 2 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}}$$

通常把  $\Delta f$  远小于信号中心频率的扫频信号称为窄带扫频,  $\Delta f$  和中心频率可以相比拟的扫频信号称为宽带扫频。

#### 2. 扫频线性

扫频线性是指扫频信号的瞬时频率和调制电压瞬时值之间的吻合程度。保持良好的扫频线性, 可以使幅频特性曲线上的频率标尺均匀分布, 便于观察, 否则将产生畸变。

#### 3. 振幅平稳性

在幅频特性曲线测试中, 必须保证扫频信号的幅度保持恒定不变, 被测电路输出信号的包络才能表征该电路的幅频特性曲线, 否则将导致错误结果。扫频信号的振幅平稳性通常用它的寄生调幅 (见 2.5.4) 来表示, 寄生调幅越小, 振幅平稳性越好。



## 5.2 AH1254B型宽频带扫频仪

AH1254B 型宽频带扫频仪是由晶体管及集成电路组成的电子测量仪器，其主要特点是：扫频宽度和中心频率均可在  $1\sim 300\text{MHz}$  内连续调节；设置有直流电源输出，以方便对 VHF 频段高频头的测试；具有点频信号输出，可作为一般信号发生器使用。

### 5.2.1 性能指标

(1) 中心频率

$1\sim 300\text{MHz}$  内连续调节。

(2) 扫频频偏

$\Delta F_{\min} \leq 1\text{MHz}$ ,  $\Delta F_{\max} \geq 300\text{MHz}$ 。扫频频偏是指扫频信号的瞬时频率和中心频率之间的差值。

(3) 扫频非线性系数

扫频频偏在  $40\text{MHz}$  内不大于 5%。

(4) 扫频信号输出电压

不小于  $250\text{mV}$ 。

(5) 扫频信号输出阻抗

$75\Omega$ 。

(6) 寄生调幅系数

频偏在  $40\text{MHz}$  内不大于 5%， $300\text{MHz}$  内不大于 10%。

(7) 输出衰减

$10\text{dB} \times 6$ ,  $1\text{dB} \times 10$  步进。

(8) 频标

$1\text{MHz}$ ,  $10\text{MHz}$  (复合),  $50\text{MHz}$  及外接。

(9) Y 轴输入衰减

分 1, 10, 100 三挡。

(10) Y 轴输入灵敏度

$4\text{mV/DIV}$ 。

(11) 辅助电压输出

$+12\text{V}$  ( $0.5\text{A}$ )，AGC 时  $0\sim 6\text{V}$  可调，AFT 时  $0\sim 12\text{V}$  可调。

(12)  $38\text{MHz}$  输出电压

不小于  $100\text{mV}$ 。

### 5.2.2 工作原理

AH1254B 型扫频仪主要由扫频信号发生器、频标发生器、显示器、 $38\text{MHz}$  信号发生器及电源等部分组成，如图 5.5 所示。

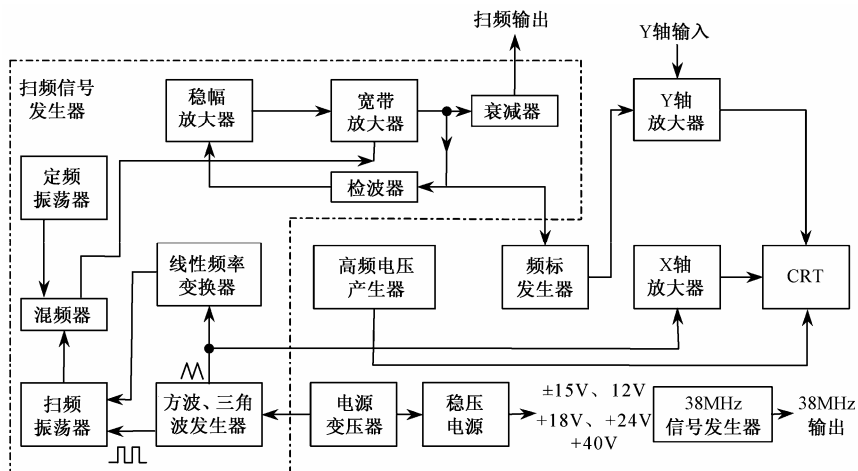


图 5.5 AH1254 型宽带扫频仪组成框图

### (1) 扫频信号发生器

扫频信号发生器包括方波及三角波发生器、线性频率变换器、扫频振荡器、混频器、定频振荡器、稳幅放大器、宽带放大器、衰减器等电路。方波及三角波发生器将降压后的 50Hz 市电放大整形成为方波，再通过积分得到三角波。三角波一路送往 X 轴放大器作为扫描信号；另一路送往线性频率变换器进行非线性处理，使加至扫频振荡器的调制信号波形形成凹形上升状。这样处理的目的是为了补偿变容二极管的变容特性带来的非线性影响，使扫频信号的瞬时频率随时间线性变化。方波信号用于控制扫频振荡器，使得在电子束回扫期间振荡器停振，从而在荧光屏上形成一条水平基线。

为了使扫频信号有较宽的频率调节范围及频偏，AH1254B 型宽带扫频仪通过差频方式获取扫频信号。定频振荡器与扫频振荡器均工作于较高频率，它们的输出信号经混频器混频后输出 1~300MHz 的扫频信号。该信号经宽带放大器放大、衰减器衰减后由面板直接输出，另一路送频标发生器，再一路经检波器检波送至稳幅放大器，放大后的电压控制 PIN (Positive Intrinsic Negative) 二极管，使得宽带放大器能够自动调整输入电平，达到自动稳定输出幅度的目的。

### (2) 高频电压发生器

高频电压发生器为示波管提供高频的后加速阳极高压，提高示波管的偏转灵敏度。

## 5.2.3 面板结构图

图 5.6 所示为 AH1254B 型扫频仪前面板结构图，面板上各开关旋钮的作用如下：

### (1) 电源亮度旋钮

电源亮度旋钮（见图 5.6 中①）拉出时，仪器接通电源；顺时针旋转，波形亮度加强，反之，变暗。



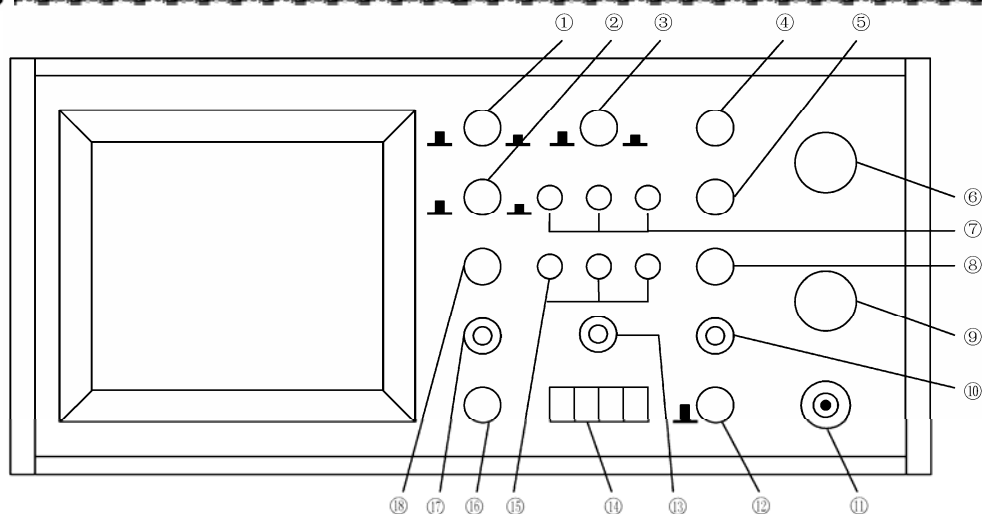


图 5.6 AH1254B 型扫频仪前面板图

### (2) Y 轴位移旋钮

Y 轴位移旋钮（见图 5.6 中②）控制特性曲线上下移动，兼作控制 Y 轴的输入耦合方式，拉出时为直流（DC）耦合，按下时为交流（AC）耦合。

### (3) 影像极性开关

影像极性开关（见图 5.6 中③）拉出时，荧光屏上显示的幅频特性曲线与 Y 轴输入信号同方向（同相），反之，为反方向（反相）。

### (4) 中心频率旋钮

中心频率旋钮（见图 5.6 中④）用于调节扫频信号的中心频率。

### (5) 频率偏移旋钮

频率偏移旋钮（见图 5.6 中⑤）用于调节扫频信号的频偏量。

### (6) 输出衰减旋钮

控制扫频信号的输出幅度，分粗衰减（粗衰减旋钮见图 5.6 中⑥）及细衰减（⑨）（细衰减旋钮见图 5.6 中⑨）两组，衰减量为两组旋钮读数之和。

### (7) Y 轴衰减开关

Y 轴衰减开关（见图 5.6 中⑦）用于控制特性曲线幅度的大小，自左至右分别为 1，10，100 挡衰减。

### (8) 频标增益旋钮

频标增益旋钮（见图 5.6 中⑧）用于控制荧光屏上频标幅度的大小。

### (9) 外接输入插座

外接输入插座（见图 5.6 中⑩）用于接收外部频标输入信号。

### (10) 射频输出（75Ω）插座

射频输出插座（见图 5.6 中⑪）用于输出扫频信号。

### (11) AGC 旋钮

AGC（见图 5.6 中⑫）旋钮拉出时，三路辅助电源（三路辅助电源插孔见图 5.6 中⑭）接通；顺时针旋转时，AGC 插孔输出电压逐渐增大。



### (12) 38MHz 输出插座

38MHz 输出插座 (见图 5.6 中⑬) 用于输出 38MHz 的定频信号。

### (13) “ $\perp$ 、AFT、AGC、+12V” 插孔

“ $\perp$ 、AFT、AGC、+12V” 插孔 (见图 5.6 中⑭) 分别用于输出 AFT (0~12V)、AGC (0~6V)、+12V 三路直流电压, 这三路电压称为辅助电源。

### (14) 频标选择 (MHz) 开关

频标选择开关 (见图 5.6 中⑮) 用于控制频标的频率值, 自左至右分别为 “1, 10”、“50”、“外接” 三挡。其中 “1, 10” 挡为复合挡, 即按下该键, 荧光屏上同时显示出 1MHz (幅度小) 和 10MHz (幅度大) 两种频标。

### (15) AFT 旋钮

AFT 旋钮 (见图 5.6 中⑯) 用于调节 AFT 插孔输出电压的大小。

### (16) Y 轴输入插座

Y 轴输入插座 (见图 5.6 中⑰) 用于接受被测电路经检波后的包络信号。

### (17) Y 轴增益旋钮

Y 轴增益旋钮 (见图 5.6 中⑱) 用于调节特性曲线幅度大小。

另外, 扫频仪后面板上还有下列开关旋钮及插座:

#### ① X 轴增益电位器

X 轴增益电位器调节荧光屏上扫描线的长短, 无需经常调整。

#### ② X 轴位移电位器

X 轴位移电位器用于调节扫描线在水平方向上的位置, 无需经常调整。

#### ③ 工作选择开关

工作选择开关用于控制射频输出 ( $75\Omega$ ) 插座输出信号的类型: 开关拨向 “扫频” 时输出扫频信号, 拨向 “点频” 时输出定频信号, 信号频率由 “中心频率” 旋钮控制。在点频状态下扫频仪相当于一台宽频信号发生器 (1~300MHz)。

## 5.2.4 扫频仪的检查、校正及使用

### 1. 扫频仪的检查、校正

① 仪器使用之前检查电源电压, “电源亮度” 旋钮拉出时接通电源。

② 调节辉度、聚焦旋钮, 以得到足够的亮度和细的扫描线, 并选择合适的输入极性 “+、-” 和 AC, DC 耦合方式。

③ 检查仪器内部频标部分, 选择 1MHz、10MHz 或 50MHz 的频标, 此时扫描基线上呈现频标信号, 调节 “频标幅度” 旋钮可以均匀地调节频标幅度。

④ 检查扫频范围。将 “频标选择” 置于 50, 频标幅度调至适当位置, 即对应于荧光屏的中心位置, 旋转 “中心频率” 旋钮时, 扫频信号中心频率的移动范围应能在 1~300MHz 内连续变化。

⑤ 频偏的检查。“频标选择” 仍置于 50, “频率偏移” 旋钮由最小旋至最大, 频偏量应能在 1~300MHz 内连续变化。

⑥ 检查扫频信号寄生调幅系数。将连接射频输出端的电缆与连接 Y 轴输入端的检波探头对接, “粗衰减” 及 “细衰减” 均置于 0, “Y 轴衰减” 置于 1, 调节 “Y 轴增益” 旋钮, 使荧光屏上显示出高度适当的梯形方框, 如图 5.7 所示。设方框最大值为 A, 最小值为 B, 则寄



生调幅系数为

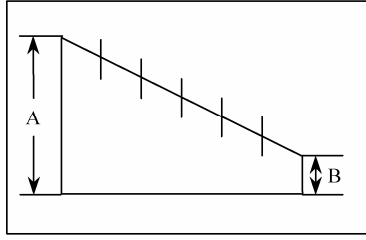


图 5.7 扫频信号寄生调幅系数的测量

$$m = \frac{A - B}{A + B} \times 100\%$$

对应不同的扫频频偏，在整个频段内  $m$  应满足技术性能中规定的要求。

⑦ 检查扫频信号的非线性系数。仍按上述连接方法连接，“中心频率”处任意位置，调节“频率偏移”旋钮使频偏在 40MHz 以内，读出在中心频率  $f_0$  两边频偏量  $\Delta F$  相等的水平距离，如图 5.8 所示。记下偏离  $f_0$  的最大距离  $A$ 、最小距离  $B$ ，则非线性系数为

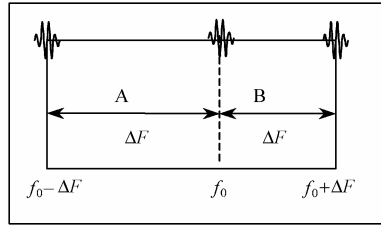


图 5.8 扫频信号非线性系数的测量

$$\gamma = \frac{A - B}{A + B} \times 100\%$$

⑧ 检查扫频输出电压。将后面板上的工作选择开关置于“点频”位置，调节“频率偏移”旋钮使频偏最小，将超高频毫伏表经  $75\Omega$  电缆接至射频输出端，此时整个频段内其输出电压应不小于 250mV。

## 2. 使用方法与注意事项

扫频仪检查、校正之后，即可进行测试。使用方法及注意事项如下：

① 测试时注意输出、输入电缆和输入检波探头的接线尽量短，探头探针不应再接另外接线。

② 测试带有检波输出的被测设备时，可直接用输入电缆连接到 Y 轴输入端。如果被测设备带有直流电位，Y 轴输入应选择 AC 耦合方式，以免损坏仪器。

③ 如需要特殊的频率标记，可选择外频标，在外频标插座上加上所需的频率信号，此信号有效值应大于 50mV。

### 5.2.5 扫频仪的应用

扫频仪的应用很广泛，尤其在无线电、电视、雷达及通信等领域内的应用更加普遍。BT-3C



型扫频仪的应用举例如下：

### 1. 电路幅频特性的测量

如图 5.9 所示连接扫频仪与被测电路，并根据被测电路的工作频率及测试条件，调节扫频仪面板上有关开关旋钮，如调节“中心频率”、“输出衰减”等旋钮，则可在荧光屏上获得被测电路的幅频特性曲线。

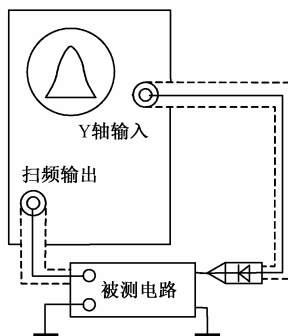


图 5.9 扫频仪与被测电路的连接

BT-3C 型扫频仪的输出特性阻抗为  $75\Omega$ ，如果被测电路的输入阻抗也为  $75\Omega$ ，可以用同轴电缆将扫频信号输出端连接到被测电路输入端。否则，应当在两者之间加阻抗匹配电路。

### 2. 电路参数的测量

根据显示的幅频特性曲线可以得出各种电路参数，电路连接如图 5.9 所示。

#### (1) 增益

调节得出幅频特性曲线后，用粗、细调衰减器控制扫频信号电压幅度，使其符合电路要求的输入信号幅度，注意衰减器的总衰减量应不大于放大器设计的总增益。若显示器的幅频高度为  $H$ ，输出衰减为  $B_1(\text{dB})$ ，将检波探头与扫频输出端短接，调节“输出衰减”旋钮，使幅频高度仍为  $H$ ，此时输出衰减的读数若为  $B_2(\text{dB})$ ，则该放大器增益为

$$A = (B_2 - B_1) (\text{dB})$$

应当注意，在得到衰减量  $B_1$  读数后，应保持扫频仪的“Y 轴增益”旋钮位置不变，否则，测量结果不准确。

#### (2) 带宽

对于宽带电路，可以直接用扫频仪的内频标方便地显示和读出频率特性曲线的宽度，为了更准确地测量，有时也使用外频标。

对于窄带调谐电路，可以由图形曲线看出谐振频率  $f_0$ ，如图 5.10 所示。使扫频仪输出衰减置于  $3\text{dB}$  处，调整 Y 增益，使图形峰点与荧光屏上某一水平刻度线（虚线 AA'）相切，然后使扫频信号输出电压增加  $3\text{dB}$ ，曲线与虚线 AA' 相交，两交点所对应的频率即为上、下限频率  $f_H$  和  $f_L$ 。则带宽为

$$BW = f_H - f_L$$

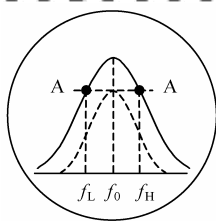


图 5.10 单调谐回路带宽的测量

### (3) 回路 $Q$ 值

电路连接如图 5.9 所示，在用外接频标测出回路的谐振频率  $f_0$  和  $f_H$ 、 $f_L$  后，回路  $Q$  值的计算如下：

$$Q=f_0/BW$$

## 5.2.6 高频阻抗的测量

扫频仪还可以测量电路的输入、输出阻抗及电缆特性阻抗，但测量精确度不很高，不过使用方便、操作简单。

### (1) 输入阻抗和输出阻抗的测量

如图 5.11 (a) 所示进行连接，图中  $RP_1$  和  $RP_2$  为无感电阻。

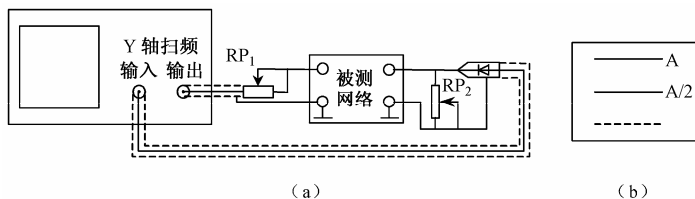


图 5.11 测量输入、输出电阻的连接示意图

测量时，先将  $RP_1$  短路、 $RP_2$  断开，调节扫频仪面板上的有关开关旋钮，使荧光屏显示的幅频特性曲线的高度为  $A$  格，如图 5.11 (b) 所示。撤去  $RP_1$  上的短路线，调节  $RP_1$  直至荧光屏显示的曲线高度为  $A/2$  格，则  $RP_1$  的电阻即为被测电路的输入电阻。

将  $RP_1$  重新短路，使曲线高度仍为  $A$  格，接通  $RP_2$  并调节其值直至曲线高度为  $A/2$  格，则  $RP_2$  的电阻值即为被测电路的输出阻抗。

应当注意，当被测电路含有选频回路时，荧光屏上显示的曲线将不可能是一条平坦直线，这时可在曲线上选取一个参考点来测量，但所得的阻抗值是对该频率而言的。

### (2) 传输线特性阻抗的测量

如图 5.12 所示进行连接。传输线的一端接可变电阻器，另一端与扫频输出电缆、检波探头并接。

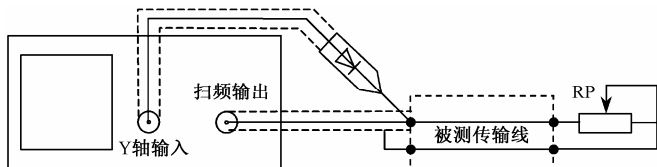


图 5.12 测量传输线特性阻抗的连接示意图



测量时,调节可变电阻  $RP$  直至荧光屏上显示的波形为一平坦直线,此时  $RP$  的电阻值即为传输线的特性阻抗。

## 5.3 频谱仪

频谱仪即频谱分析仪,它能够将构成非正弦波信号的基波与各次谐波的频率及幅度显示在荧光屏上,得到非正弦波的频谱图,由此得到时域观测所不能得到的独特信息。而示波器则将被测信号的波形显示在荧光屏上,并对信号进行时域分析,但不能显示出构成非正弦波信号频率分量的情况。频谱仪除用于信号频谱分析外,还用于放大器谐波失真、信号发生器频谱纯度以及系统频率特性分析等。

频谱仪分为数字式和模拟式两大类,应用比较普遍的是模拟式频谱仪。模拟式频谱仪分为顺序滤波式、扫频外差式等,主要用于射频段和微波频段。数字式频谱仪主要用于低频段和超低频段。本节重点讨论扫频外差式频谱仪。

### 5.3.1 工作原理

#### 1. 顺序滤波式

顺序滤波式频谱仪的基本原理是利用一系列窄带滤波器,依次选取被测信号中不同频率分量的信号,并借助于扫描电压,将不同频率分量的幅度并排显示在荧光屏上,得到被测信号的频谱图,如图 5.13 所示。

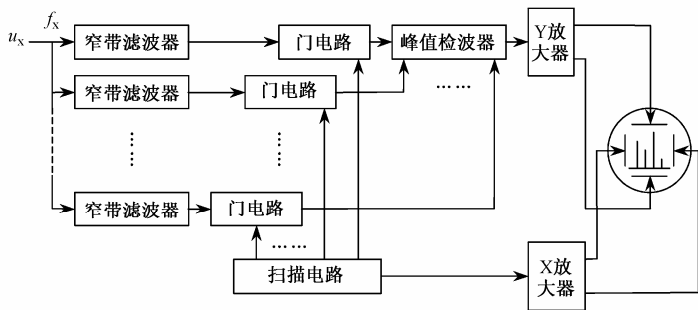


图 5.13 顺序滤波式频谱仪原理图

顺序滤波式频谱仪需要大量高稳定度的窄带滤波器,因仪器造价较高而较少采用。使用比较普遍的是扫频外差式频谱仪。

#### 2. 扫频外差式

扫频外差式频谱仪的工作原理如图 5.14 (a) 所示。被测信号经衰减器进入频谱仪后与扫频信号混频得到中频信号。中频信号经中频放大、峰值检波、视频滤波,以及 Y 放大器放大等,送至示波管 Y 偏转板以显示对应频率分量的频谱幅度。该分量的频率  $f_x$  为

$$f_x = f_s - f_i \quad (5-1)$$

式中,  $f_s$  为扫频信号频率,  $f_i$  为中频信号频率。

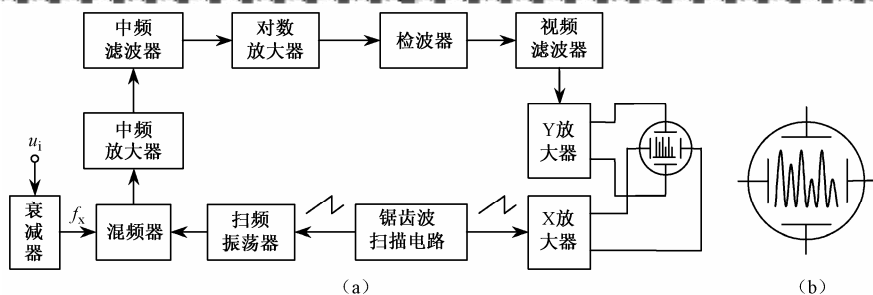


图 5.14 扫频外差式频谱仪组成框图

由于扫频信号的频率是连续变化的，所以被测信号中所有符合式 (5-1) 关系的频率分量均可显示在荧光屏上，显示幅度则与该频率分量的大小成正比。例如，假设中频频率为 6MHz，本振频率为 9~13MHz，则输入信号中 3MHz、4MHz、5MHz、6MHz、7MHz 的频率分量均得以显示。由于加至 X 偏转板的锯齿波扫描电压也是扫频振荡器的调制电压，所以荧光屏上亮点相对起始点的水平距离与频率成正比，从而使被测信号的频谱图显示在荧光屏上。

扫频外差式频谱仪工作的实质是将扫频信号与被测信号差频得到固定的中频信号，即所谓的“扫频”、“外差”。因此，与顺序滤波式频谱仪相比，扫频外差式频谱仪只需一个窄带滤波器，而中频放大器即起到窄带滤波器的作用。

由于滤波器具有一定的带宽，所以显示的频谱线并非理想的直线，而是一排窄带滤波器的动态幅频特性曲线，如图 5.14 (b) 所示。

扫频外差式频谱仪各部分的作用总结如下：

#### (1) 输入衰减器

输入衰减器除了对输入信号进行衰减以保护混频器及其他电路外，还起到与输入设备阻抗匹配的作用以实现功率测量。输入衰减器与中频放大器等配合使用实现频谱幅度的调节。

#### (2) 混频器

混频器用于对扫频信号和被测信号进行混频以实现信号的频谱搬移得到频谱分量。

#### (3) 中频滤波器

中频滤波器用于分辨不同频率的信号。中频滤波器的带宽和形状将影响频谱仪的许多关键指标，如测量分辨率、测量灵敏度、测量速度与测量精度等。

#### (4) 检波器

检波器负责将输入信号转换为电压值与频率分量大小相对应的视频电压。不同特性的输入信号，如正弦信号、噪声信号、随机调制信号等，应采用不同检波方式以准确测出该信号的大小。

#### (5) 视频滤波器

视频滤波器对检波器的输出进行低通滤波。减小视频滤波器的带宽可对频谱显示中的噪声抖动进行平滑，从而减小显示噪声的抖动范围。这样更有利于频谱仪在测试过程中发现被噪声淹没的小功率连续信号，还可提高测量的可重复性。

#### (6) 对数放大器

为了扩大频谱仪测量信号大小的动态范围，要对幅值坐标进行“对数化”（取对数）以压缩谱线幅度。对数放大器则用于放大“对数化”后输出信号的幅度以提高测量灵敏度。



### 5.3.2 组成实例

BP-28 型音频 (20Hz~20MHz) 频谱仪的结构如同选频电压表, 其组成框图如图 5.15 所示。被测信号经输入衰减获得合适电平 (10mV) 后, 送至前置放大器, 由低通滤波器滤除 20MHz 以上的分量, 再送入混频器与扫频信号差频。当被测信号中的某一分量与扫频信号相差一个中频时, 混频器的输出经选频放大器及中频衰减器分别送入线性放大器和对数放大器, 再经中频放大器输出至机外, 另一路经检波器接到电压表, 并由检波器输出直流电压。

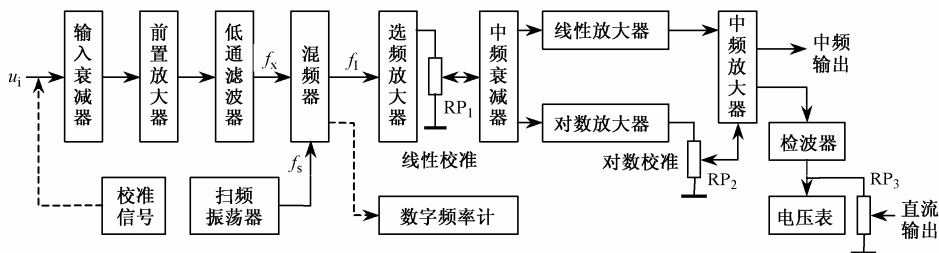


图 5.15 BP-28 型音频频谱仪原理框图

对频谱仪校准时, 将 10kHz、10mV 的校准信号接至输入端, 对仪器进行幅度校准。

扫频振荡器中的可变电容器与直流输出电位器  $RP_3$  的刻度盘同轴, 使振荡器的频率与直流输出电压和刻度线三者同步, 所以直流输出的每一个电压值均代表不同的频率值, 该频率值可由刻度线读出。当用直流输出电压驱动记录仪的 X 轴时, X 轴的移动距离代表频率值, 出现在 X 轴某一位置的谱线长度, 表示被测信号该频率分量的幅值。

该频谱仪的选频放大器中使用晶体滤波器, 可在 4Hz, 30Hz, 150Hz 三种频率上人工选择; 有线性放大器和对数放大器可供选择, 以取得合适的频率坐标标度; 扫频振荡器的频率用微电动机实现自动扫频。

由于该频谱仪可以对信号或系统的各种谐波进行准确的测量, 因而可作为高灵敏度谐波失真仪使用; 其可提供音频扫频信号, 用以测量频率特性曲线; 由于中心频率可以连续调节, 因而亦可作为有源滤波器使用。

### 5.3.3 主要性能指标解析

#### (1) 频率范围

频率范围是指达到频谱仪规定性能指标时被测信号的频率范围, 它取决于扫频振荡器的频率范围。

#### (2) 扫频宽度

扫频宽度又称为分析谱宽, 其含义是频谱仪在一次测量过程 (即一个扫描正程) 中显示的频率范围。为了观测被测信号频谱的全貌, 需要较宽的扫频宽度; 为了分析频谱图中的细节, 则需要窄带扫描。因此, 频谱仪的扫频宽度应是可调的。每厘米相对应的扫频宽度, 称为频宽因数。扫频宽度很宽的频谱仪称为全景频谱仪, 可以观测到信号频谱的全貌。

每完成一次频谱分析所需要的时间称为分析时间, 即扫描正程时间, 指的是扫频振荡器扫描完整个扫频宽度所需要的时间。扫频宽度与分析时间之比称为扫频速度。

#### (3) 频率分辨力

频率分辨力即频率分辨率, 是指频谱仪能够分辨的最小谱线间隔, 反映了频谱仪分辨两





个频率间隔信号的能力。频率分辨力取决于频谱仪的分辨率带宽。分辨率带宽即中频带宽，它与频谱仪内部中频滤波器、扫频振荡器等性能有关。

由于荧光屏显示的谱线实际上是中频滤波器（或窄带滤波器）的动态幅频特性曲线，所以定义该幅频特性的 3dB 带宽为频谱仪的频率分辨力。又由于中频滤波器（或窄带滤波器）的幅频特性曲线形状与频率变化速度有关，故分辨力亦与扫频速度有关，并包括以下两种。

- ① 扫频速度为零时，静态幅频特性曲线的 3dB 带宽称为静态分辨力。
- ② 在扫频工作（扫频速度不为零）时，动态幅频特性曲线的 3dB 带宽称为动态分辨力。在技术说明书中给出的一般是静态分辨力。显然，动态分辨力低于静态分辨力，而且速度越快，动态分辨力越低。

（4）动态范围

动态范围是表征频谱仪分析大信号与小信号频谱的能力，动态范围的上限由频谱仪的非线性失真所决定。频谱仪的动态范围一般在 60dB 以上，有时甚至达 90dB。为了适应不同测量的需要，频谱仪的幅值显示方式具有两种选择：线性显示和对数显示。对数显示时要用到对数放大器，而线性显示用线性放大器。

（5）灵敏度

灵敏度是表征频谱仪测量微小信号的能力。频谱仪灵敏度定义为在一定分辨带宽下所显示的平均噪声电平。频谱仪灵敏度与分辨率带宽、视频带宽、衰减器设置有关。

5.4 频谱仪的使用

5.4.1 使用注意事项

在频谱仪面板上“扫频宽度”、“频率标记”、“频带宽度”都是可调的，应根据被测信号频谱的特性合理地选择使用有关的旋钮。

1. 扫频宽度的选择

扫频宽度应根据被测信号的频谱宽度进行选择。例如，分析一个调幅波的扫频宽度应大于  $2f_m$  ( $f_m$  为最大音频调制频率)；而要观测是否存在二次谐波的调制边带，扫频宽度应大于  $4f_m$ 。

2. 带宽的选择

静态分辨力  $B_q$  越高（数值越小），要求扫频宽度越窄，反之，变宽。为了使  $B_q$  与扫频宽度相适应，可参考表 5-1 进行选择。一般情况下，宽带扫频可选  $B_q=150\text{Hz}$ ，而窄带扫频可选  $B_q=6\text{Hz}$ 。

表 5-1 频谱仪静态分辨力的参考范围

扫频宽度	5~30kHz	1.5~10kHz	<2kHz
静态分辨力	150Hz	30Hz	6Hz

3. 扫频速度的选择

当扫频宽度与静态分辨力选定后，扫频速度的选择以获得较高的动态分辨力为准则。同



时还应合理地处理动态分辨力并分析时间的矛盾,因为在扫频宽度一定时,扫频速度的选择实际上就是分析时间的选择。分析时间越长,即扫频速度越慢,则动态分辨力越接近静态分辨力。当动、静态分辨力相等时,动态分辨力最高,但分析时间长。一般可按下列经验式选择:

$$v_s \leq B_q^2$$

式中,  $v_s$  为扫频速度,单位为 Hz/s;  $B_q$  为静态分辨力,单位为 Hz。

现代频谱仪通常装有微处理器,可根据输入信号,自动设置最佳分析带宽、分析时间等参数,无需人工调节,实现自动操作,并具有高的准确度和高分辨力。

### 5.4.2 频谱仪的操作与使用

AT6011 频谱仪具有测量幅度范围宽、频率范围广、灵敏度高、使用方便、操作灵活的特点,并具备跟踪信号发生器。

#### 1. 主要性能指标

##### (1) 频率性能指标

- ① 频率范围 0.15~1050 MHz。
- ② 频率分辨力 10kHz (5 位数字显示)。
- ③ 中心频率调节范围 0.15~1050MHz。
- ④ 扫频宽度范围 零挡,以及 1~1000MHz (按 1-2-5 分挡)。
- ⑤ 分辨率带宽 400kHz, 20kHz。
- ⑥ 视频滤波器带宽 4kHz。

##### (2) 幅度性能指标

① 幅度范围 -100~+13dBm。当信号强度达到顶格水平线时,信号的幅度为-27dBm,每下降一格(DIV, Division)减小 10dBm。如果全部按下频谱仪上的 40dB 衰减器最高水平刻度线幅度为+13dBm (=40-27dBm)。

② 显示 CRT 荧光屏,宽、高尺寸分别为 10DIV、8DIV。

③ 参考电平范围 -27~+13dBm (每级 10dBm)。

##### (3) 输入/输出

① 连接器 输入/输出连接器均为 N 系列射频同轴连接器。N 系列射频同轴连接器是按 MIL-C-39012、IEC169-16 和 CECC22210 国际标准生产的一种具有螺纹连接结构的中大功率连接器,具有抗振性强、可靠性高、机械和电气性能优良等特点,广泛用于振动和环境恶劣条件下的无线电设备和仪器射频同轴电缆的连接。

② 输入阻抗、输出阻抗 50Ω。

③ 最大持续射频输入电平 10~40dB 衰减时为+20dBm(0.1W),0dB 衰减时为+10dBm。

④ 最大直流输入电压 ±25V。

⑤ 音频输出端 插孔孔径为  $\varnothing 3.5\text{mm}$ ,经扬声器连接插头输出。

⑥ 输出频率范围 0.15~1050MHz。

⑦ 输出电平 -50~0dBm (10dB 步进和连续调节)。

#### 2. 前面板结构

AT6011 型频谱仪前面板结构示意图如图 5.16 所示,各开关旋钮的作用如下。

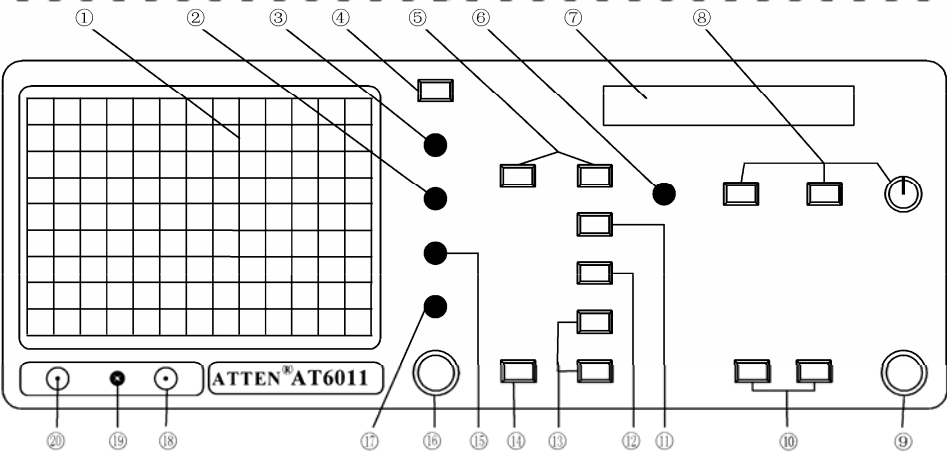


图 5.16 AT6011 型频谱仪前面板结构图

- ① 显示荧光屏 阴极射线示波管显示器，用于显示频谱图。
- ② 聚焦旋钮（FOCUS） 用于亮点聚焦调节。
- ③ 亮度调节旋钮（INTENS） 用于亮点亮度调节。
- ④ 电源开关（POWER） 电源开关被按下后，频谱仪开始工作。
- ⑤ 参考电平（REF-LEVEL） 用于改变顶格水平线的参考电平，共有-27dBm，-17dBm，-7dBm，+3dBm，+13dBm 五种可供选择。按动左边的按键，参考电平变大；按动右边的按键，参考电平变小。其中，分贝毫伏（dBmV）的定义式为

$$\text{分贝毫伏(dBmV)}=201\text{g}\frac{U_x(\text{mV})}{1\text{mV}}\text{dBm}$$

式中， $U_x$  为被测电压有效值，单位为 mV。

分贝毫伏（dBmV）与电压的对应关系如表 5-2 所示。

表 5-2 分贝毫伏（dBmV）与电压的对应关系

衰减器	参考电平（顶格线）	对应电压	基线（底格线）	每格 dBm 数
0dB	-27dBm	10mV	-107dBm	-10dBm
10dB	-17dBm	31.6mV	-97dBm	-10dBm
20dB	-7dBm	0.1V	-87dBm	-10dBm
30dB	+3dBm	316mV	-77dBm	-10dBm
40dB	+13dBm	1V	-67dBm	-10dBm

分贝毫瓦（dBmW）的定义式为

$$\text{分贝毫瓦(dBmW)}=10\text{lg}\frac{P_x(\text{mW})}{1\text{mW}}(\text{dBmW})$$

式中， $P_x$  为被测信号功率，单位为 mW。

例如，40mW 对应的分贝毫瓦（dBmW）为

$$10\text{g}(40\text{mW}/1\text{mW})=46\text{dBmW}$$

- ⑥ 光迹旋转（TR） 调节光迹旋转旋钮可以使水平扫描线与水平刻度线基本对齐。
- ⑦ LCD 数码显示 2 行 16 个字 LCD 显示，用于显示单位为 MHz 的中心频率和扫频宽度，以及单位为 dBm 的顶格参考电平。



⑧ 中心频率粗调 (CENTER FREQ) 和细调 (TUNING) 用于调整中心频率, 中心频率是指显示在荧光屏水平方向中心位置的频率。调整中心频率的按键有使中心频率按 50MHz 递增和递减的两个按键, 以及右边用于连续改变中心频率的频率细调旋钮。当频率细调旋钮被按下时, 中心频率变为零赫兹。中心频率的调节应根据扫频宽度的不同而改变。

⑨ 测量输入端 (INPUT) 被测信号输入端, 输入阻抗为  $50\Omega$ 。该频谱仪允许的最大输入电平为 +10dBm 或直流 +25V, 若超过最大电平, 将损坏输入级。

⑩ 扫频宽度 (SPAN) 用于调节频谱仪水平方向总的扫频宽度, 扫频宽度在荧光屏上的显示以 MHz 为单位。扫频宽度调节键分按 1~2~5 步进行变换的递增和递减左右两个按键, 变换范围为 1~1000MHz, 即水平方向 0.1~100MHz/DIV。例如, 扫频宽度设为 1000MHz (100MHz/DIV), 中心频率设为 500MHz 时, 显示频率以 100MHz/DIV 扩展至右边, 最右边的刻度线是 1000MHz ( $500\text{MHz} + 5 \times 100\text{MHz}$ ), 最左边的为 0Hz。

如果中心频率相对于扫频宽度较低时, 在荧光屏最左边看到的一条谱线为“0 频率”谱线。该谱线是由于第一本振 (扫频振荡器) 频率通过第一中频而产生的。

“0 频率”谱线的幅度对每台频谱仪是不一样的, 故不能作参考电平使用。显示在“0 频率”谱线左边的谱线被称为镜频。

⑪ 视频滤波器 (VBW) 用于降低荧光屏上的噪声以利于观察, 它的带宽为 4kHz。

⑫ 分辨率带宽 (RBW) 有 400kHz 和 20kHz 两种带宽可供选择。分辨率带宽选择的越窄, 频谱的清晰度越好, 但当扫频宽度过宽时, 由于所需扫描时间的延长会造成信号的幅度降低, 故应根据扫频宽度选择合适的分辨率带宽。一般情况下, 选择 20kHz 带宽时, 噪声电平降低, 选择性提高, 谱线清晰度较好。

⑬ 输出衰减器 (ATTN) 输出衰减器由 10dB 衰减器组成, 用于改变跟踪信号发生器输出信号的大小。输出衰减器分上下两个按键, 分别使输出信号增大和减小。

⑭ 跟踪信号发生器工作控制按键 (TG-POW) 按下该键, 上部指示灯点亮, 跟踪信号发生器开始工作, 从输出端输出正弦信号。

⑮ Y 轴移位 (Y-POS) 调节 Y 轴移位旋钮使频谱线在荧光屏上产生垂直方向的移动。

⑯ 输出端 (OUTPUT) 跟踪信号发生器由该输出端输出在 0~-50dBm 范围内可调节的正弦信号, 其大小由输出衰减器调节。

⑰ 输出电平调节 (LEVEL) 输出电平调节旋钮用于连续调节跟踪信号发生器输出电平的大小。输出衰减器为 0 时的调节范围为 0~-10dBm。

⑱ 耳机插孔 (PHONE) 当频谱仪调节好某一频谱时, 通过经此插孔接入的耳机或扬声器可听到解调输出的音频信号。该插孔直径为 3.5mm。

⑲ 耳机音量 (VOL) 调节耳机输出音量的高低。

⑳ 探头电源 (PROBE POWER) AZ530-H 等高阻抗探头所需的 +6V 直流电源由此端经专用电源线提供。

### 3. 频谱仪的使用

频谱仪的使用比较复杂, 需要不断积累学习, 才能正确操作, 灵活使用。下面以频谱仪在手机维修中的应用为例加以介绍。

#### (1) 信号连接

频谱仪测量手机信号时, 一般用高频电缆将信号测试点与频谱仪进行直接连接, 而无需



接地线。但有的测试点因为存在阻抗匹配问题，不能直接测量，此时可选用 AZ530-H 等高阻抗探头进行测量。

## （2）操作方法

利用频谱仪可以比较方便地测量手机射频信号。例如，测量诺基亚 N1100 第二中频信号（6MHz），其操作方法如下：

- ① 打开频谱仪，调节亮度和聚焦旋钮，使荧光屏上显示的亮度合适、图像清晰。
- ② 调节扫频宽度选择（SPAN）按键使荧光屏水平方向每格频率为 1MHz。
- ③ 调节中心频率“粗/细”调按键旋钮使中心频率为 6MHz。
- ④ 将频谱仪探头外壳与电路主板接地点相连，探针插到第二中频滤波器的输出端。在电流表指针摆动时观察频谱仪荧光屏上是否有脉冲式图像，正常情况下，当电流表指针摆动时，有脉冲图像出现在荧光屏水平方向中心位置。

再如，用频谱仪测量诺基亚 N1100 功放输出信号的频谱，可按以下步骤进行测量。

- ① 打开频谱仪，调节亮度和聚焦旋钮，使荧光屏上显示清晰的图像。
- ② 调节中心频率“粗/细”调按键旋钮使中心频率为 900MHz。
- ③ 调节扫频宽度（SPAN）选择键使荧光屏水平方向每格频率为 10MHz。
- ④ 将频谱仪外壳与 N1100 主板接地点相连、探针与功放输出端相接，并拨打“112”，观察电流表摆动的同时观看频谱仪荧光屏上是否有脉冲图像，正常情况下，在 900MHz 频标附近会出现脉冲图像，但幅度会超出荧光屏范围，可以按下衰减器按键使整个图像处在荧光屏范围内。

注意，频谱仪测量的是高频信号，被测信号的幅度范围有限。若超出范围，需另加相应的衰减器，以免损坏高频探头。

## 5.4.3 频谱仪的应用

频谱仪是一种多功能的测量仪器，可用来测量信号电平、谐波失真、调制系数、频率稳定性和频谱纯度等参数。用于查找干扰的实例如下：

### 1. 测量发射机的辐射型杂波辐射

无线发射机的辐射型杂波辐射是指用标准信号作为调制信号，发射机发生除载波和由调制信号决定的边带以外离散频率的辐射。测量发射机的辐射型杂波辐射对接收机，尤其对接收带宽过大的接收机将造成严重的影响。

图 5.17 为测量发射机杂波辐射的电路连接图，图中“输出”是指通过天线输出。首先使发射机在未调制状态下工作，将频谱仪调整在发射机载频频率上，则载波峰值电平在荧光屏上显示在 0dB 线上。然后调节频谱仪的频率旋钮在 100kHz~1000MHz 或 4 倍载频的范围内变化，记下各杂波辐射电平。最后在发射机上加调制信号，重复以上测量过程。

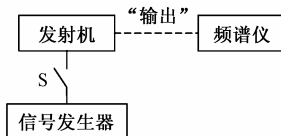


图 5.17 发射机的杂波辐射测量



当载波功率大于 25W 时，离散频率的杂波辐射功率应比载波功率电平小 70dB；当载波功率小于或等于 25W 时，离散频率的辐射功率电平应不大于 2.5 $\mu$ V。

## 2. 测量接收机的杂波辐射

接收机的杂波辐射是指由接收机引起的辐射。杂波辐射电平包括：

- ① 杂波辐射在天线端的功率电平。
- ② 由机箱和设备结构屏蔽不良引起的辐射，即机箱辐射。

图 5.18 为测量电路连接图，图中“输入”是指通过天线输入。首先打开接收机电源，将开关 S 置于“1”，用频谱仪寻找 100kHz~2GHz 以内的任何杂波辐射分量。然后将开关 S 置于“2”，用信号发生器输出模拟杂波辐射分量的信号，以确定其杂波辐射分量的电平值。

在测量机箱辐射时，应将被测接收机置于屏蔽室内或无辐射的场所。

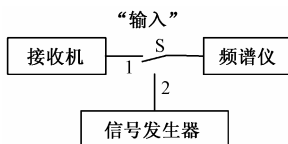


图 5.18 接收机的杂波辐射测量



## 本章小结

本章主要介绍频域测量及仪器的组成与工作原理。

(1) 扫频仪是一种能直接观测被测电路幅频特性曲线的仪器，可以用来测量被测电路带宽、品质因数等，主要由扫描信号源、扫频信号源、频标电路和示波器（X-Y 方式）等组成。

(2) 扫频仪的频标分为菱形频标和针形频标，用于进行频率标度，一般利用差频电路产生，二者分别适于高频、低频测量。

(3) 频谱仪是信号频域分析的重要工具。频谱仪除用于信号的频谱分析外，还用于分析放大器的谐波失真、信号发生器的频谱纯度以及系统的频率特性等。

(4) 频谱仪按其工作原理分为数字式和模拟式两大类。最常用的是扫频外差式频谱仪，它包括外差和扫频两个含义。

(5) 频谱仪的性能指标包括：频率范围、扫频宽度、频率分辨率、动态范围及灵敏度。频率分辨率包括动态分辨率和静态分辨率，前者低于后者。

(6) 频谱仪面板设置的“扫频宽度”、“频带宽度”等旋钮都是可调的，应根据被测信号频谱的特性合理选择开关旋钮的位置。



## 习题 5

1. 结合图 5.5 说明扫频外差式扫频仪的组成？各部分的作用是什么？
2. 扫频仪的扫描信号可以是正弦半波信号吗？如果可以，需要对扫频信号源提供停振控制信号吗？为什么？
3. 扫频仪的 X 轴为什么可以用来表示频率轴？
4. 扫频仪、频谱仪的用途是什么？用于什么领域的测量？与示波器的区别是什么？
5. 结合图 5.6 简要说明如何正确使用扫频仪？
6. 画出扫频仪与频谱仪的原理组成框图，并比较二者在电路组成上的区别与联系。
7. 简要分析说明扫频外差式频谱仪的工作原理。
8. 结合图 5.16 简要说明如何正确使用频谱仪。

# 第 6 章 电子元器件测量与仪器



**学习参考：**本章主要介绍电阻、电感、电容、晶体管等电子元器件的测量及测试仪器的组成原理，要求通过本章学习理解电子元器件的测试方法及原理，了解测量仪器的组成及使用方法。

**本章要点：**集中参数元件的等效，集中参数元件的测量方法、工作原理及电桥、Q 表、晶体管特性图示仪的组成及使用。

## 6.1 概述

当元器件的几何尺寸远小于工作信号波长时，电阻、电容、电感主要表现出与之名称相符的阻抗特性，称之为集中参数元件；晶体三极管、场效应管等表现为各自的基本特性，称之为集中参数器件。集中参数元件的测量是指对电阻值、电容量、电感量、电感品质因数和电容损耗因数的测量。集中参数器件的测量主要是指对晶体三极管、场效应管等特性曲线的显示与有关参数的测量。集中参数元件的等效如下。

### 1. 电阻器的等效

如图 6.1 所示，实际电阻器可以等效为纯电阻  $R$  与寄生电感  $L_R$  的串联。寄生电感是由于绕制电阻的金属丝或碳膜电阻制造过程中的刻槽等原因产生的。在低频（设角频率为  $\omega$ ）状态下，因为  $\omega L_R$  很小，故可以忽略寄生电感  $L_R$  的影响，但在高频状态下，应考虑  $L_R$  的影响。

### 2. 电容器的等效

在工作频率不很高的情况下，实际电容器可以等效为串联损耗电阻  $R_{CS}$  与纯电容  $C$  的串联，如图 6.2（a）所示；或者等效为并联损耗电阻  $R_{CP}$  与纯电容  $C$  的并联，如图 6.2（b）所示。通常用损耗因数  $D_x$ （或损耗角正切  $\tan\delta$ ）来表示电容器的损耗大小。图 6.2（a）和图 6.2（b）所示电路损耗因数  $D_x$  的定义分别是：

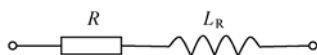


图 6.1 实际电阻器的等效电路

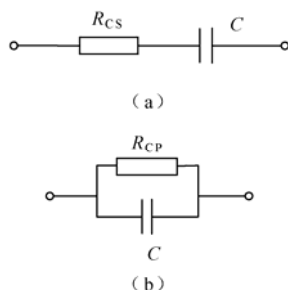


图 6.2 实际电容器的等效电路





$$D_x = \tan \delta = R_{CS} / X_C = \omega C R_{CS}$$

$$D_x = \tan \delta = X_C / R_{CP} = 1 / \omega C R_{CP}$$

式中,  $X_C$  为电容器的容抗;  $\delta$  为电容器的损耗角。

### 3. 电感器的等效

在工作频率不很高的情况下, 实际电感器可以等效为串联损耗电阻  $R_{LS}$  与纯电感  $L$  的串联, 如图 6.3 (a) 所示; 或者等效为并联损耗电阻  $R_{LP}$  与纯电感  $L$  的并联, 如图 6.3 (b) 所示。通常用品质因数  $Q$  来表示电感器的损耗大小, 图 6.3 (a)、图 6.3 (b) 品质因数  $Q$  的定义分别是:

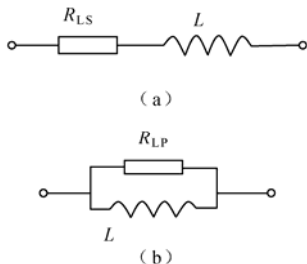


图 6.3 实际电感器的等效电路

$$Q = X_L / R_{LS} = \omega L / R_{LS}$$

$$Q = R_{LP} / X_L = R_{LP} / \omega L$$

集中参数元件的测量方法主要包括伏安法、电桥法和谐振法三种。

## 6.2 伏安法及数字化测量

### 6.2.1 伏安法

伏安法即电压表-电流表法, 它是根据欧姆定律来测量元件集中参数的。该方法使用方便, 但测量精确度较差, 仅适用于低频测量, 比较适合直流电阻的测量。

图 6.4 (a) 和图 6.4 (b) 分别为电流表外接、内接的伏安法测量集中参数元件原理图。在忽略电压表、电流表内阻影响的情况下, 根据欧姆定律有:

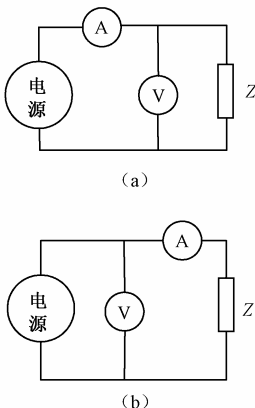


图 6.4 伏安法测量原理图



$$Z=U/I$$

式中,  $Z$  为被测元件阻抗的模值;  $U$  为电压表读数值;  $I$  为电流表读数值。以后如无特别说明,  $Z$  均为集中参数元件阻抗的模值。

当测量直流电阻时, 电源为直流电源, 则

$$R=U/I$$

当测量电容或电感时, 以角频率为  $\omega$  的交流电压作为电源, 由电容、电感等效电路的分析可知, 二者均可等效为电阻与电抗的串联, 即阻抗的模值  $Z$  为

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

在忽略损耗电阻影响的情况下, 存在如下关系:

$$U/I = Z = \sqrt{R^2 + X^2} \approx X$$

$$X_C = 1/\omega C$$

$$X_L = \omega L$$

$$L = U/\omega I; C = I/\omega U \quad (6-1)$$

上述分析中, 均忽略了电压表、电流表内阻的影响, 如果考虑仪表内阻的影响, 图 6.4 (a) 因为电压表内阻对电流表读数值的分流, 使得阻抗的测量值要比实际值小; 图 6.4 (b) 则因电流表内阻的分压, 使得阻抗的测量值要比实际值大。显然, 当被测电感或电阻较大, 以及被测电容较小时, 适合采用电流表内接法测量; 反之, 适合采用电流表外接法测量。

由式 (6-1) 可知, 测量电感或电容时, 如果保持  $U$ 、 $I$ 、 $\omega$  中的两个参数不变, 只改变剩余的一个参数, 可以实现电感或电容的直接测量。例如, 测量电容时, 如果保持角频率  $\omega$  和电压  $U$  不变, 则流过电容器的电流  $I$  与电容  $C$  之间存在单值对应关系, 故可将电流表以法拉为单位标度直接测量电容, 称之为法拉计。

伏安法可以测量  $1\Omega$  到数百  $M\Omega$  范围内的电阻以及  $1pF$  到数百微法的电容。

## 6.2.2 阻抗的数字化测量

阻抗的数字化测量是首先利用正弦信号在阻抗两端产生交流电压, 然后对电压实部和虚部进行分离, 最后利用电压的数字化测量实现电阻值、电容量、电感量等参数的测量。

### 1. 电感元件的测量

图 6.5 为电感-电压 ( $L$ - $V$ ) 变换器原理图。图中左半部分为阻抗-电压变换部分; 两个同步检波器实现实部和虚部分离; 峰值检波器实现交-直流电压变换, 并提供基准电压  $U_r$ 。  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_r$  都要送到电压表双积分式 A/D 变换器。

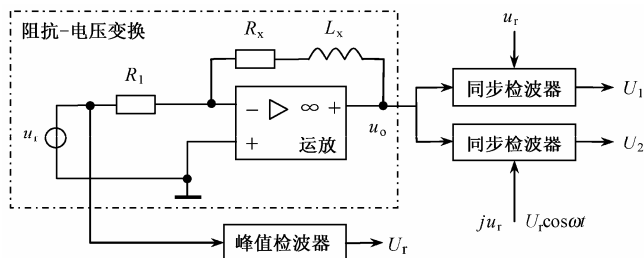


图 6.5 电感-电压变换器



设标准正弦波信号为  $u_r(t)=U_r\sin\omega t$ , 则  $u_o$  为

$$u_o(t)=-\frac{U_r R_x}{R_1}\sin\omega t-j\frac{U_r\omega L_x}{R_1}\sin\omega t$$

经推导得知

$$U_1=-\frac{U_r}{R_1}R_x$$

$$U_2=-\frac{U_r}{R_1}\omega L_x$$

显然, 因为  $U_r$ 、 $R_1$  均为常数, 只要利用双积分式数字电压表测出  $U_1$ 、 $U_2$ , 即可换算出  $R_x$ 、 $L_x$  及  $Q_x$  的大小来。

## 2. 电容元件的测量

图 6.6 为电容—电压变换器的阻抗—交流变换部分, 其他部分与电感—电压变换器的结构相似。利用上述方法, 可得

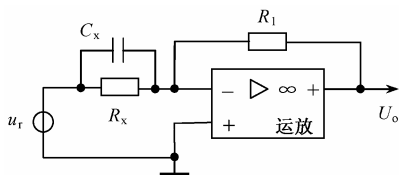


图 6.6 电容—电压变换器

$$U_1=\frac{R_1}{R_x}U_r$$

$$U_2=-R_1U_r\omega C_x$$

由此可见, 也可以利用数字电压表实现  $C_x$ 、 $R_x$  及  $D_x$  的测量。

## 3. LCR参数测试仪

图 6.7 为 LCR 参数测试仪原理图。经分析得

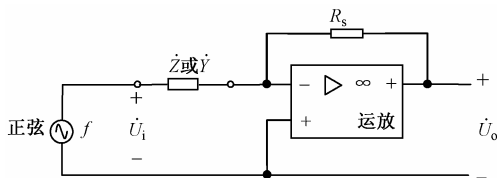


图 6.7 LCR 参数测试仪原理图

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}=-\frac{R_s}{Z}=-\dot{Y}R_s$$

$$\dot{U}_i=-\frac{\dot{U}_o}{R_s}(R+jX)$$

$$\dot{Z}=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=R+jX \quad (\Omega)$$



$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = G + jB \quad (S)$$

式中,  $R$  为等效串联电阻;  $X$  为等效串联电抗;  $G$  为等效并联电导;  $B$  为等效并联电纳。

显然, 只要先测出  $\dot{U}_i$  和  $\dot{U}_o$ , 再把  $\dot{U}_i$  和  $\dot{U}_o$  同步整流并分解出实部和虚部, 进而计算出上式中  $R, X, G, B$  后, 即可以数字形式显示出被测元件  $R, L, C, D, Q$  等参数。

测量电感或电容时, 可以选择它们的串联等效电路或并联等效电路来进行测量。一般来说, 对小电容和大电感, 采用并联等效电路测量, 而对电解电容等大电容或小电感采用串联等效电路进行测量。

## 6.3 电桥法测量集中参数元件

电桥法又称为指零法, 是利用零指示器作为电桥平衡指示器, 根据电桥平衡时, 各桥臂之间的关系来确定被测量。所用的测量仪器称为平衡电桥或电桥。平衡电桥分为直流电桥和交流电桥两大类, 前者用于测量直流电阻, 后者用于测量电容、电感等参数。电桥法的工作频率较宽, 测量精度较高, 可达  $10^{-4}$ , 比较适合低频阻抗元件的测量。在此主要讨论交流电桥。

### 6.3.1 交流电桥

#### 1. 工作原理

图 6.8 为交流电桥原理图, 主要由桥体、电源  $G$  及平衡指示器  $P$  等组成。桥体由  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_x$  四个桥臂组成, 桥臂由电阻和电抗元件组成。电源为纯正弦交流电源。当  $I_P=0$  时, 电桥处于平衡状态。电桥平衡条件如下:

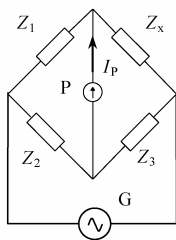


图 6.8 交流电桥

$$\dot{Z}_x \dot{Z}_2 = \dot{Z}_1 \dot{Z}_3$$

或

$$|Z_x||Z_2|e^{j(\phi_x+\phi_2)} = |Z_1||Z_3|e^{j(\phi_1+\phi_3)}$$

即

$$|Z_x||Z_2| = |Z_1||Z_3| \quad (6-2)$$

$$\phi_x + \phi_2 = \phi_1 + \phi_3 \quad (6-3)$$

式中,  $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3, \dot{Z}_x$  为四个桥臂的复阻抗,  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_x$  为四个桥臂的阻抗模值,  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_x$  为四个桥臂的阻抗幅角。

由此可见, 要使交流电桥完全平衡, 必须同时满足式 (6-2) 和式 (6-3), 即振幅平衡条件和相位平衡条件。所以当相邻两桥臂为纯电阻时, 另外两个桥臂应呈现同性电抗; 当某一对相对桥臂为纯电阻时, 另一相对桥臂应呈现异性电抗; 当两个桥臂由纯电阻构成时, 呈现电抗特性的桥臂必须由标准可调电阻和电抗件构成, 该电抗件一般选用标准可调电容。设  $Z_1, Z_2$  为纯电阻  $R_1, R_2$  时, 满足关系:

$$\dot{Z}_x = \frac{R_1}{R_2} \dot{Z}_3 \quad (6-4)$$



设  $Z_1$ 、 $Z_3$  为纯电阻  $R_1$ 、 $R_3$  时, 满足关系:

$$\dot{Z}_x = \frac{R_1 R_3}{\dot{Z}_2} \quad (6-5)$$

当两个相邻桥臂为纯电阻时, 满足式 (6-4) 关系, 称之为臂比电桥, 它比较适合测量电容; 当两个相对桥臂为纯电阻时, 满足式 (6-5) 关系, 称为臂乘电桥, 它比较适合测量电感。

交流电桥的电源必须为纯正弦波交流电源, 否则, 由于电源中频率成分的复杂, 会使电桥产生假平衡, 从而产生很大的误差。为了提高测量精确度,  $I_P$  要经过选频放大器放大、检波器检波后送入检流计; 为了减小杂散耦合的影响, 电桥各部分之间要良好屏蔽。但即使如此, 交流电桥也仅适合在音频或低射频频段使用, 否则, 由于高频段所用的高频电源本身也是干扰源, 而且高频段要求的屏蔽效果难以达到, 所以交流电桥不适合在高频段测量。

【例 6-1】图 6.9 (a) 为测量低  $Q$  电感的麦克斯韦电桥桥体, 试求  $R_x$ 、 $L_x$ 、 $Q_x$  各是多少?

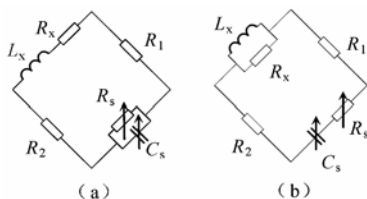


图 6.9 例 6-1、例 6-2 图

解: 该交流电桥平衡条件为

$$R_1 R_2 = (R_x + j\omega L_x) \frac{1}{\frac{1}{R_s} + j\omega C_s}$$

经推导, 得

$$R_x = R_1 R_2 / R_s$$

$$L_x = R_1 R_2 C_s$$

$$Q_x = \omega L_x / R_x = \omega R_s C_s$$

【例 6-2】图 6.9 (b) 为测量高  $Q$  电感的海氏电桥桥体, 试求  $R_x$ 、 $L_x$ 、 $Q_x$  各是多少?

解: 该交流电桥平衡条件为

$$R_1 R_2 = \left( R_x + \frac{1}{j\omega C_s} \right) \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{j\omega L_x}}$$

经推导, 得

$$R_x = R_1 R_2 / R_s$$

$$L_x = R_1 R_2 C_s$$

$$Q_x = R_x / \omega L_x = 1 / \omega R_s C_s$$

【例 6-3】图 6.10 (a) 为测量低损耗电容的串联电阻式比较电桥桥体, 试求  $R_x$ 、 $C_x$ 、 $D_x$  各是多少?

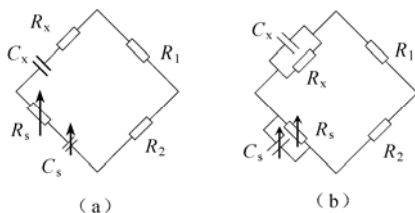


图 6.10 例 6-3、例 6-4 图

解：该交流电桥平衡条件为

$$R_1(R_s + \frac{1}{j\omega C_s}) = (R_x + \frac{1}{j\omega C_x})R_2$$

经推导，得知

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s$$

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_s$$

$$D_x = \omega C_x R_x = \omega R_s C_s$$

【例 6-4】图 6.10 (b) 所示为测量高损耗电容的并联电阻式比较电桥桥体，试求  $R_x$ 、 $C_x$ 、 $D_x$  各是多少？

解：该交流电桥平衡条件为

$$\frac{R_1}{\frac{1}{R_s} + j\omega C_s} = \frac{R_2}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x}$$

经推导，得

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s$$

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_s$$

$$D_x = 1/\omega R_s C_s$$

## 2. QS18A型万用电桥

### (1) 组成

QS18A 型万用电桥是一种便携式交流电桥，主要用于测量电阻、电感、电容等参数。它主要由桥体、信号源（1kHz）和晶体管检流计三部分组成，如图 6.11 所示。桥体是电桥的核心部分，实际上是由直流电桥、交流电容电桥及电感电桥组合而成。使用时，通过变换开关进行切换，以实现不同参数的测量或量程的变换。

### (2) 测量电容

测量电容时，桥体的连接如图 6.12 所示。 $C_x$  和  $R_x$  为被测电容的串联等效电容与电阻， $R_2$  由标准粗调、细调电阻器组成。调节桥体中可调电阻器使电桥平衡，根据电桥平衡条件，得

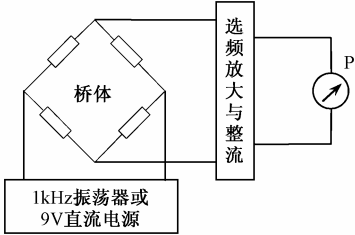


图 6.11 QS18A 型万用电桥组成框图

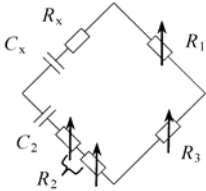


图 6.12 测量电容原理图

$$R_x = \frac{R_1}{R_3} R_2$$

$$C_x = \frac{R_3}{R_1} C_2$$

$$D_x = \omega R_2 C_2$$

由此可见，在量程确定的情况下，只要  $C_2$  保持不变，可以通过调节  $R_3$  使电桥平衡。其中， $C_x$ 、 $R_x$ 、 $D_x$  可由有关度盘读出数值。

(3) 测量电感

测量电感时，桥体连接如图 6.13 所示。 $L_x$  和  $R_x$  为被测电感的串联等效电感与电阻。当电桥平衡时有：

$$L_x = R_1 R_2 C_3$$

$$R_x = \frac{R_1}{R_3} R_2$$

$$Q_x = \omega C_3 R_3$$

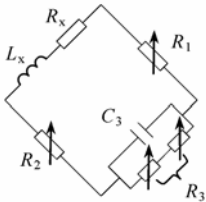


图 6.13 测量电感原理图

(4) 使用方法

图 6.14 为 QS18A 型万用电桥前面板结构图。

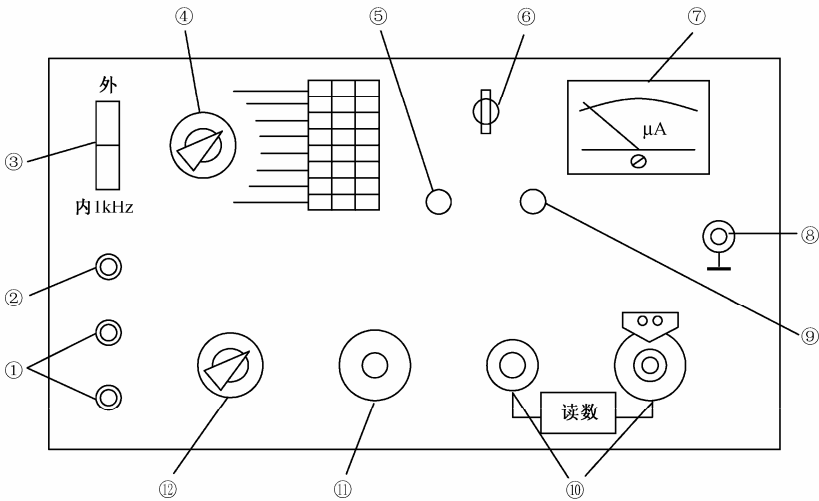


图 6.14 QS18A 型万用电桥前面板结构图

面板上各开关旋钮的作用如下：



- ① 测元件接线柱，用于连接被测元件。
- ② 外接插孔，用于外接音频电源。
- ③ 外-内 1kHz 选择开关，用于选择电桥工作电源。
- ④ 量程开关，确定测量范围，各示值是指电桥读数在满刻度时的最大值。
- ⑤ 损耗微调旋钮，用于细调平衡时的损耗，一般情况下置于“0”位置。
- ⑥ 损耗倍率选择开关，分为  $Q \times 1$ 、 $D \times 0.1$ 、 $D \times 1$  三挡。根据不同情况，按照表 6-1 选择合适挡位。测量电阻时，该开关不起作用。

表 6-1 倍率选择开关的位置选择

被测元件名称	倍率开关位置
空心电感线圈	$Q \times 1$
高 $Q$ 值线圈和小损耗电容	$D \times 0.1$ ( $Q=1/D$ )
带铁心线圈和大电解电容	$D \times 1$ ( $Q=1/D$ )

- ⑦ 指示电表，用于指示电桥的平衡状态。当电桥平衡时，电表指示为零。
- ⑧ 接地，漏电保护接地。
- ⑨ 灵敏度调节旋钮，用于控制电桥放大器的放大倍数。开始测量时，应降低灵敏度，随后再逐渐增大。
- ⑩ 读数调节旋钮（读数盘），用于调节电桥的平衡状态，由粗调和细调组成。
- ⑪ 损耗平衡调节旋钮，用于指示被测电容（或电感）的损耗因数（或品质因数）。
- ⑫ 测量选择开关，用于确定电桥的测量内容。测量完毕，此开关应置于“关”位置，以降低机内干电池的损耗。

QS18A 型万用电桥的使用方法如下：

- ① 将被测元件接到“被测元件接线柱”，拨动电源选择开关至“内 1kHz”位置。如果用外部电源，则将外部电源接到“外接”插孔上，拨动电源选择开关至“外”的位置。
- ② 根据被测量，将测量选择开关旋至“C”、“L”、“ $R \leq 10$ ”或“ $R > 10$ ”处。
- ③ 估计被测量的大小，选择量程开关的位置。
- ④ 根据被测元件的情况，按照表 6-1 选择合适的损耗倍率选择开关挡位。
- ⑤ 根据电桥平衡情况，调整灵敏度调节旋钮使指示电表读数由小逐步增大。
- ⑥ 反复调节电桥的读数盘和损耗平衡旋钮，并在调整过程中逐步提高指示电表的灵敏度直至电桥平衡。此时存在如下关系：

$$L_x \text{ (或 } C_x) = \text{量程开关指示值} \times \text{电桥读数盘示值}$$

$$Q_x \text{ (或 } D_x) = \text{损耗倍率指示值} \times \text{损耗平衡盘指示值}$$

**【例 6-5】**用 QS18A 型万用电桥测量线圈的电感量  $L_x$  及  $Q_x$  值，当电桥平衡时，左边读数盘（粗调）示值为 0.6，右边读数盘（细调）示值为 0.028，量程开关在“100mH”挡上，损耗倍率开关在“ $Q \times 1$ ”挡上，损耗平衡盘读数为 3.5，求被测电感  $L_x$  和品质因数  $Q_x$ 。

**解：**由 QS18A 型万用电桥的使用方法介绍，可知：

$$L_x = (0.6 + 0.028) \times 100\text{mH} = 62.8\text{mH}$$

$$Q_x = 1 \times 3.5 = 3.5$$

答：（略）





### 6.3.2 不平衡电桥

依据电桥平衡条件进行测量的电桥称为平衡电桥,它的操作繁琐、测量时间长,平时所说的电桥通常指的是平衡电桥。不平衡电桥是通过直接测量电桥非平衡状态下流经指示器的电流或两端电压大小来测量集中参数元件的,它的操作简便、测量时间短、易实现测量数字化。

#### 1. 测量电阻

图 6.15 为新型不平衡电桥测量电阻的电路图,图中  $U_o = \frac{U'_{AB}}{U'_{BD}}$ 。

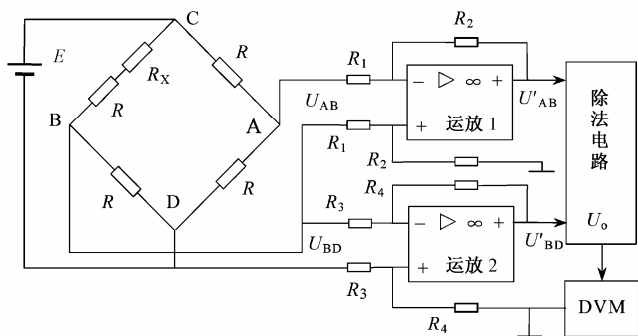


图 6.15 新型不平衡电桥测量电阻电路

经推导,得

$$\begin{aligned}
 U_{AB} &= \frac{R_x / (2R)}{1 + R_x / (2R)} \frac{E}{2} \\
 U_{BD} &= \frac{1}{1 + R_x / (2R)} \frac{E}{2} \\
 U'_{AB} &= -\frac{R_2}{R_1} U_{AB} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{R_x / (2R)}{1 + R_x / (2R)} \frac{E}{2} \\
 U'_{BD} &= -\frac{R_4}{R_3} U_{BD} = -\frac{R_4}{R_3} \frac{1}{1 + R_x / (2R)} \frac{E}{2} \\
 U_o &= \frac{U'_{AB}}{U'_{BD}} = -\frac{R_2 R_3}{R_1 R_4} \frac{R_x}{2R} \quad (6-6)
 \end{aligned}$$

分析式(6-6)可见,不平衡电桥可以快速方便地测量电阻量;新型不平衡电桥电压  $U_o$  还与其电源电压无关,电源电压的波动对测量不产生影响;电压  $U_o$  与被测电阻  $R_x$  成正比,使测量示值线性化,测量准确度较高。老式不平衡电桥示值非线性,受电源电压等的影响大,测量准确度较低。

#### 2. 测量电感、电容

不平衡电桥测量电感电路与图 6.15 所示相似,分别用标准电感  $L$ 、被测电感  $L_x$  代替标准电阻  $R$  和被测电阻  $R_x$ 。测量电容时,分别用标准电容  $C$ 、被测电容  $C_x$  代替  $R$  和  $R_x$ 。测量电感、电容时,用交流电源代替直流电源。



经进一步推导得知, 测量电感、电容时存在关系:

$$U_o = \frac{U'_{AB}}{U'_{BD}} = \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4} \frac{L_x}{2L}$$

$$U_o = \frac{U'_{AB}}{U'_{BD}} = \frac{2R_1 R_4}{R_2 R_3} \frac{C_x}{C}$$

因此, 不平衡电桥可以快速方便地测量电感量、电容量, 其不足之处是不能测量品质因数、损耗因数等参数。

## 6.4 谐振法测量集中参数元件

谐振法又称为  $Q$  表法, 是以  $LC$  谐振回路谐振特性为基础进行测量的方法。在高频段, 谐振法受杂散耦合等的影响较小, 且比较符合电感、电容的实际工作情况, 因此, 谐振法高频段的测量结果比较可靠, 是测量高频元件的常用方法。

### 6.4.1 $Q$ 表的组成及工作原理

谐振法构成的测量仪器称为  $Q$  表, 适合在高频状态下测量电容量、电感量、电容损耗因数及电感品质因数等参数。它由测量回路、信号源、耦合回路及  $Q$  值电压表等组成, 图 6.16 为  $Q$  表工作原理图, 设测量回路电流有效值、总电感、总电容为  $I$ 、 $L$ 、 $C$ 。  $Q$  表各组成部分的作用如下:

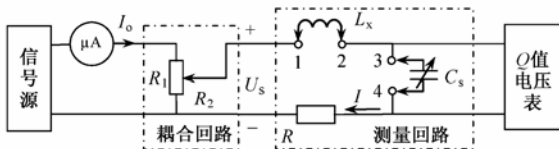


图 6.16  $Q$  表工作原理图

#### (1) 信号源

信号源为正弦波信号源, 其振荡频率范围即为  $Q$  表工作频率范围。

#### (2) 耦合回路

耦合回路用于将信号源输出的信号耦合到测量回路, 有电感耦合、电容耦合和电阻耦合等方式。低频段通常为电阻耦合方式, 高频段、超高频段  $Q$  表则分别选用电容、电感作为耦合元件。与测量回路的耦合应为松耦合, 否则, 由于信号源内阻的影响较大, 将使测量回路的幅频特性曲线变得平坦, 从而造成谐振点误判而产生较大的误差。例如, 图 6.16 所示中的耦合电阻  $R_2$  要很小 (如  $0.04\Omega$ )。耦合电阻又称为插入电阻。

#### (3) $Q$ 值电压表

即  $Q$  值刻度的电压表, 用于指示  $Q$  值大小。当  $Q$  值电压表指示最大时, 测量回路处于谐振状态。

#### (4) 测量回路

即  $LC$  谐振回路, 它由电感、电容及回路等效损耗电阻  $R$  组成。在测量电感或电容时,  $R$  近似等于被测电感或电容的串联等效电阻。

如果测量回路处于谐振状态, 存在如下关系:



$$U_L = -U_C, X_L = X_C, U_s = IR = I_0 R_2$$

$$f_s = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} \quad (6-7)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L}$$

当测量电感时, 被测电感的品质因数  $Q_L$  为

$$Q_L \approx \frac{X_L}{R} = \frac{X_L \cdot I}{R \cdot I} = \frac{U_C}{U_s} = Q_P$$

当测量电容时, 标准电感接入 1、2, 被测电容接入 3、4。被测电容的损耗因数  $D_C$  为

$$D_C \approx \frac{R}{X_C} = \frac{I \cdot R}{I \cdot X_C} = \frac{U_s}{U_C} = \frac{1}{Q_P}$$

可见, 在  $U_s$  一定时, 电压表可以刻度成为  $Q$  值指示器, 设指示值为  $Q_P$ ; 改变  $I_0$  值可以扩大品质因数的测量范围, 电流表称为  $Q$  值倍乘指示器。

### 6.4.2 测量电感

谐振法测量电感, 除了依据式 (6-7) 直接测量外, 还包括串联替代法和并联替代法。

#### 1. 串联替代法

串联替代法适合测量小电感, 如图 6.17 所示。图中信号源与测量回路之间采用的互感耦合方式为松耦合, 测量步骤如下:

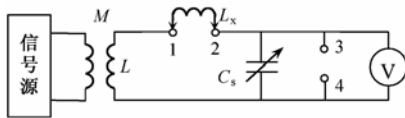


图 6.17 串联替代法测量电感原理图

① 将 1、2 端短接, 调节  $C_s$  到较大电容  $C_1$  位置, 调节信号源频率, 使回路谐振, 设谐振频率为  $f_0$ , 此时满足:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_1} \quad (6-8)$$

② 去掉 1、2 之间的短路线, 将  $L_x$  接入回路, 保持信号源频率  $f_0$  不变, 调节  $C_s$  至  $C_2$  使回路重新谐振, 此时满足:

$$L_x + L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_2} \quad (6-9)$$

③ 求解式 (6-8) 和式 (6-9) 组成的方程组, 得

$$L_x = \frac{C_1 - C_2}{4\pi^2 f_0^2 C_1 C_2}$$



## 2. 并联替代法

并联替代法适合测量大电感, 始终将图 6.17 中 1、2 两端始终短接。测量步骤如下:

① 不接入  $L_x$ , 调节可变电容  $C_s$  为  $C_1$ , 调节信号源频率使回路谐振, 设谐振频率为  $f_0$ , 此时满足:

$$\frac{1}{L} = 4\pi^2 f_0^2 C_1 \quad (6-10)$$

② 将  $L_x$  接至 3、4 端, 保持信号源频率  $f_0$  不变, 调节  $C_s$  至  $C_2$  使回路重新谐振, 此时满足:

$$\frac{1}{L} + \frac{1}{L_x} = 4\pi^2 f_0^2 C_2 \quad (6-11)$$

③ 求解式 (6-10) 和式 (6-11) 组成的方程组, 得

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 (C_2 - C_1)}$$

### 6.4.3 测量电容

谐振法测量电容, 一般采用串联替代法和并联替代法。替代法可以有效地消除分布电容或引线电感所造成的影响, 提高测量准确度。

#### 1. 串联替代法

串联替代法适合测量大电容, 如图 6.17 所示。测量步骤如下:

① 将 1、2 端短接, 调节可变电容  $C_s$  为  $C_1$ , 调节信号源频率使测量回路谐振, 设谐振频率为  $f_0$ 。

② 去掉短路线, 将被测电容  $C_x$  接至 1、2 端, 保持信号源频率  $f_0$  不变, 调节  $C_s$  至  $C_2$  使测量回路重新谐振。

③ 上述两步, 测量回路中的电感以及前后两次的谐振频率未变, 因此前后两次测量回路的等效电容值相等的, 即

$$C_1 = \frac{C_x C_2}{C_x + C_2}$$

$$C_x = \frac{C_2 C_1}{C_2 - C_1}$$

#### 2. 并联替代法

并联替代法适合测量小电容, 如图 6.17 所示, 图中 1、2 端始终短接或接入一标准电感, 测量步骤如下:

① 不接入被测电容  $C_x$ , 调大可变电容  $C_s$  为  $C_1$ , 调节信号源频率使测量回路谐振, 设谐振频率为  $f_0$ 。

② 将被测电容  $C_x$  接至 3、4 端, 保持信号源频率  $f_0$  不变, 调节  $C_s$  至  $C_2$  使测量回路重新谐振。

③ 上述两步, 测量回路中的电感以及前后两次的谐振频率未变, 因此前后两次测量回路的等效电容值相等, 即

$$C_1=C_2+C_x$$
$$C_x=C_1-C_2$$

6.4.4 Q表实例及使用方法

图 6.18 为 QBG-3 型 Q 表面板图，它的使用方法如下：

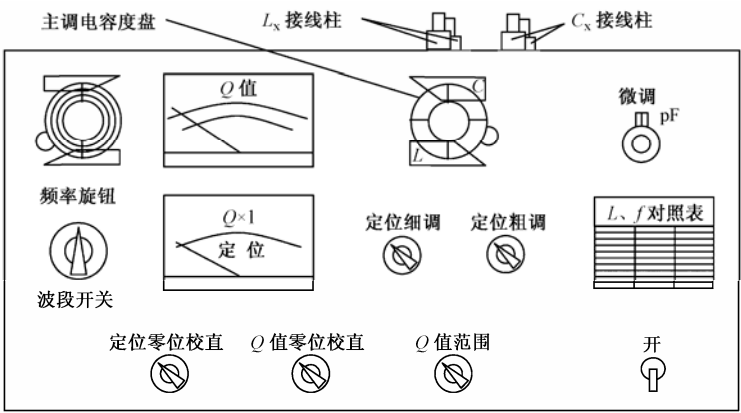


图 6.18 QBG-3 型 Q 表面板图

1. 测量准备

测量前先对定位表和 Q 值表进行机械调零，然后将定位粗调逆时针调到底，将“定位零位校直”和“Q 值零位校直”置于中间，“微调（电容）”调到零，开机预热 10min。

2. 电感线圈 Q 值的测量

将被测线圈接到 L<sub>x</sub> 接线柱上；调节频率旋钮及波段开关至测量所需的频率点；选择合适的 Q 值挡级；调节“定位零位校直”旋钮使定位表指示为零，调节“定位粗调”及“定位细调”旋钮使定位表指针指到“Q×1”处；调整主调电容度盘远离谐振点，再调节“Q 值零位校直”使 Q 值表指针指在零点上，最后调解主调电容度盘和微调旋钮使回路谐振（Q 值表指示最大），则 Q 值表的示值即为被测线圈的 Q 值。

3. 电感量的测量

首先估计一下被测线圈的电感量，按照表 6-2 选出对应频率，再调节波段开关及频率旋钮使信号源频率达到所需频率值；将“微调”置于零点，调节主调电容度盘使 Q 值表指示最大。此时，被测线圈的电感量等于主调电容度盘上读出的电感值乘以 L、f、倍率对照表中的倍率。

表 6-2 L、f 对照表

电感	倍率	频率
0.1~1μH	×0.1	25.2MHz
1.0~10μH	×1	7.95MHz
10~100μH	×10	2.52MHz
0.1~1.0mH	×0.1	795kHz
1.0~10mH	×1	252kHz
10~100mH	×10	79.5kHz



#### 4. 线圈分布电容的测量

将主调电容量盘调至某一适当电容值上（一般为 200pF），记为  $C_1$ ；再调节波段开关及频率旋钮使  $Q$  值表指示最大，即找到谐振点  $f_1$ ；重新调节波段开关、频率旋钮使信号源频率为  $f_1$  的两倍，然后调节主调电容量盘使  $Q$  值表指示最大，记为  $C_2$ 。则分布电容量  $C_0$  可由下式计算：

$$C_0 = (C_1 - 4C_2) / 3$$

#### 5. 电容量的测量

被测电容量大小不同，其测量方法也不同。主要有以下两种情况：

##### （1）小于 460pF 电容的测量

可以采用并联替代法测量。从  $Q$  表附件中选取一只电感量大于 1mH 的标准电感接至  $L_x$  接线柱，将“微调”调到零，主调电容量盘调至最大（500pF），记为  $C_1$ ；然后调节“定位零位校直”和“ $Q$  值零位校直”旋钮使定位表及  $Q$  表指示为零，再调节“定位粗调”及“定位细调”旋钮使定位表指针指在“ $Q \times 1$ ”处；最后调节频率旋钮及波段开关，使  $Q$  表指示最大。将被测电容接至  $C_x$  接线柱，重新调节主调电容量盘使  $Q$  表指示最大，设电容量盘读数为  $C_2$ ，则被测电容  $C_x$  的计算式为

$$C_x = C_1 - C_2$$

##### （2）大于 460pF 电容的测量

可以采用串联替代法测量。将标准电感接至  $L_x$  接线柱，调节主调电容量盘，使  $Q$  表指示最大，设电容读盘读数为  $C_1$ ；取下标准电感，将其与被测电容串联后再接于  $L_x$  接线柱上，重新调节主调电容量盘使  $Q$  表指示再次达到最大，设电容量盘读数为  $C_2$ 。被测电容  $C_x$  为

$$C_x = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}$$

#### 6. 电容损耗因数的测量

首先将主调电容量盘调至 500pF，记为  $C_1$ ，将大于 1mH 的标准电感接至  $L_x$  接线柱，调节波段开关及频率旋钮使  $Q$  表指示最大，设它的读数为  $Q_1$ ；然后将被测电容并接于  $C_x$  接线柱上，调小主调电容量盘至某值，设为  $C_2$ ，重调信号源频率使  $Q$  表再次指示最大，设读数为  $Q_2$ ，则损耗因数  $D_x$  为

$$D_x = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} \frac{C_1}{C_1 - C_2}$$

#### 7. 注意事项

在使用  $Q$  表测量过程中应注意，被测元件不能直接放在仪器顶板上，要加一块高频损耗小的如聚乙烯之类的衬垫板；被测元件接线要短且接触良好；被测元件的屏蔽罩要接到低电位接线柱上。

### 6.5 晶体管特性图示仪及应用

晶体管特性图示仪简称为图示仪，是一种采用图示法在荧光屏上直接显示各种晶体三极



管、场效应管等的特性曲线，并据此测算器件各项参数的器件测试仪器。例如，测量 PNP 和 NPN 型三极管的输入特性、输出特性、电流放大特性、反向饱和电流、击穿电压；各类晶体二极管的正反向特性；场效应管漏极特性、转移特性、夹断电压和跨导等参数。

晶体管特性图示仪具有用途广泛、直接显示、使用方便、操作简单等优点。尤其在对晶体管各种极限参数和击穿特性的观测过程中，采用瞬时电压和瞬时电流能使被测晶体管仅承受瞬时的过载而不会造成损坏，因此对晶体管的测试和晶体管的合理应用带来极大方便，但图示仪不能用于测量晶体管的高频参数。

### 6.5.1 晶体管特性图示仪的组成

图 6.19 所示是共发射极 NPN 型三极管输出特性曲线及其逐点测量法示意图。如图 6.19 (a) 所示测试电路中，先固定基极电流  $I_B$ ，改变  $E_C$  值，可测得一组  $u_{CE}$  和  $i_C$  值；再改变基极电流  $I_B$ ，重复上述过程，可测得多组数值。适当选取坐标，即可得到三极管输出特性曲线，如图 6.19 (b) 所示。

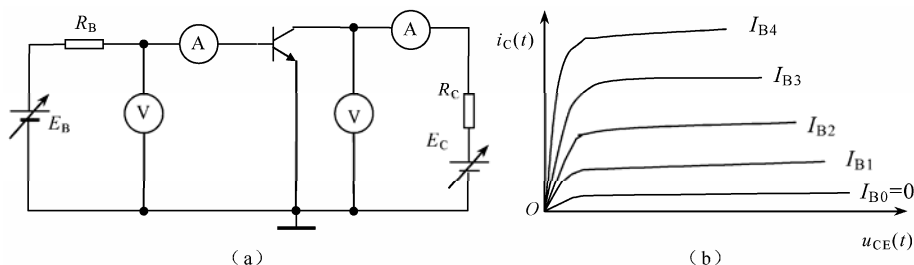


图 6.19 晶体三极管输出特性曲线及逐点测量法示意图

晶体管特性图示仪的测量为动态测量法，逐点测量法是晶体管特性图示仪的测量原理的基础。晶体管特性图示仪应具备以下功能：

- ① 能够提供测试过程所需的各种基极电流  $I_B$ 。
- ② 每一个固定  $I_B$  期间，集电极电源  $E_C$  应作相应改变。
- ③ 能够及时取出各组  $u_{CE}$  及  $i_C$  值送显示电路。

晶体管特性图示仪主要由阶梯波发生器、集电极扫描信号源、测试变换电路、控制电路、X-Y 方式示波器等部分组成，如图 6.20 所示。因为  $u_Y(t) \approx i_C(t)R_s$ ，所以  $u_Y(t)$  能够反映  $i_C(t)$  的变化情况。而且集电极扫描信号源与  $u_{CE}(t)$  的变化一致，因此将  $u_Y(t)$  与集电极扫描电压加到示波器上即可得到三极管输出特性曲线。各组成部分的功能如下。

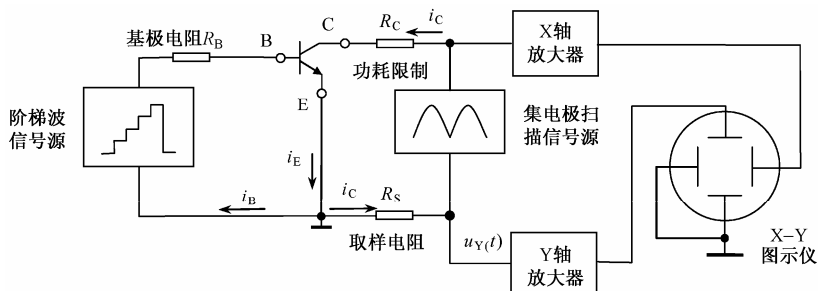


图 6.20 晶体管特性图示仪组成框图



① 阶梯波信号源该信号源用于提供测试所需的各种基极阶梯电压或电流  $I_B$ ，图 6.21 (b) 为基极电流波形图，阶梯高度可以调节，用于形成多条曲线簇。为避免被测管功耗过大而损坏，一般选用图 6.22 所示占空比可调的脉冲阶梯波，这样既可使晶体管导通时间减小，避免损坏被测管，又能够提高图示仪的性能。

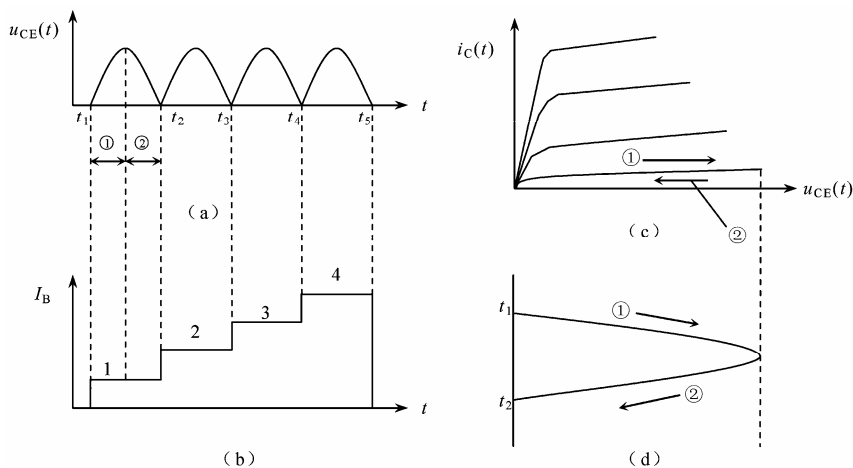


图 6.21 晶体管特性图示仪各点波形

② 集电极扫描信号源在每一个固定  $I_B$  期间，集电极扫描信号源使集电极电压  $u_{CE}(t)$  作相应改变。 $u_{CE}(t)$  通常是由 50Hz 市电经全波整流得到的 100Hz 正弦半波电压，如图 6.21 (a)、图 6.21 (d) 所示。

③ X-Y 方式示波器 X 放大器和 Y 放大器用于对取自被测器件上的电压信号进行放大，然后送示波管 X 和 Y 偏转板以形成扫描曲线。X 放大器、Y 放大器与示波管一起构成 X-Y 方式的示波器。

④ 测试变换电路该电路是为适应测试 NPN、PNP 管而设立的。通过测试变换电路可使晶体管基极电压、电流和阶梯波、集电极扫描电压的极性按不同要求而改变，并选择合适的显示信号送至 X 和 Y 偏转板，以显示各种不同的特性曲线。

⑤ 控制电路控制电路用于完成集电极扫描信号源与阶梯波信号源的同步等功能。

集电极扫描电压（或  $u_{CE}(t)$ ）与  $u_Y(t)$  被放大后，分别加到 X、Y 偏转板上，得到图 6.21 (c) 所示的输出特性曲线。图 6.21 (c) 中的①、②分别对应于图 6.21 (a) 中的①、②，箭头表明了得到输出特性曲线的扫描方向，特性曲线自下而上分别与图 6.21 (b) 中的 1~4 相对应，描绘曲线的速率为 100 条/秒，二者的同步关系称为上 100 级/秒（每秒 100 个台阶），如图 6.23 (a) 所示。 $T_C$  为扫描信号源周期， $T_B$  为阶梯波周期，改变二者的时间关系可以得到不同的曲线，图 6.23 (b) 和图 6.23 (c) 所示的同步关系分别称为 200 级/秒（每秒 200 个台阶）、下 100 级/秒。

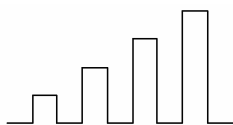


图 6.22 脉冲阶梯波



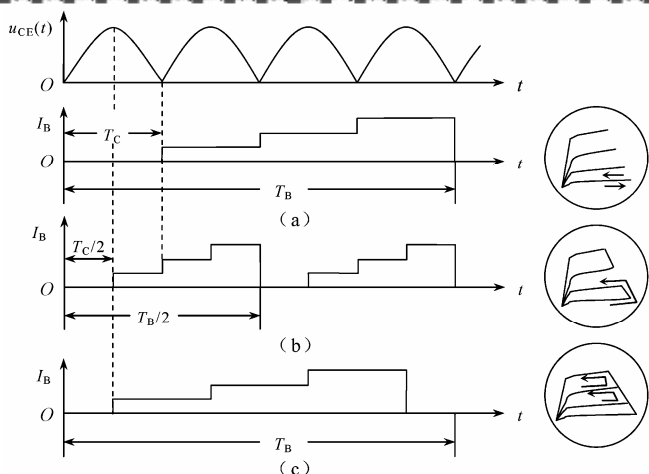


图 6.23 晶体管特性图示仪的三种同步关系

### 6.5.2 阶梯波信号源

图 6.24 为阶梯波信号源组成框图,主要由阶梯波形成级、阶梯波放大器等部分组成。50Hz 正弦波经过移相、整流送入脉冲形成级,经限幅放大变为窄脉冲,阶梯波形成级在开关电路的控制下产生阶梯波电压输出,再经过阶梯波放大器放大输出所需的阶梯波电压,或者根据需要由阶梯波放大器输出放大的阶梯波电流。

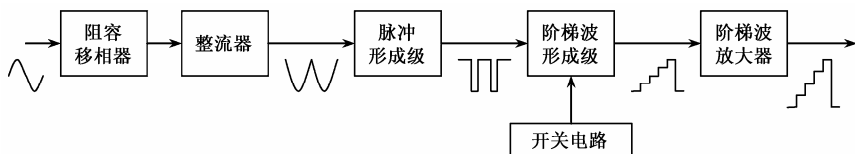


图 6.24 阶梯波信号源组成框图

图 6.25 所示为 JT-1 型晶体管特性图示仪的密勒积分型阶梯波形成电路。放大器为反向放大器,由于它的电压增益、输入阻抗很大、输出阻抗很小,则  $U_A \rightarrow 0$ 。S 为开关电路控制开关。 $C_1$ 、 $VD_1$  为嵌位电容和嵌位二极管。

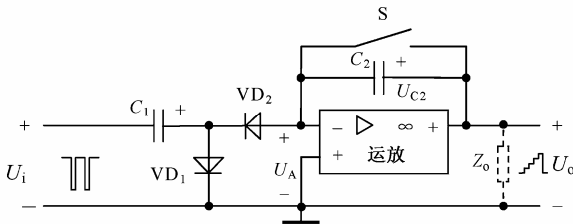


图 6.25 密勒积分型阶梯波形成电路

当 S 断开时,输入负脉冲  $U_i$  经电路输出阻抗  $Z_0$  和  $VD_2$  对电容  $C_2$  充电,  $U_o = U_{C2}$ 。当第一个脉冲到来时,  $C_2$  的充电电源为  $U_i$ ,  $C_2$  上充电  $\Delta U_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_i$ ; 第二个脉冲到来时,充电电源为  $U_i + \Delta U_1$ , 由于  $C_2$  上已有电压  $\Delta U_1$ , 所以净充电电源仍为  $U_i$ , 同样, 以后各次充电均如此,



输出端得到正向均匀阶梯波电压，调节  $C_1$  和  $C_2$  可调节台阶大小。

当 S 闭合时，电容  $C_2$  迅速放电，电路无输出。当再次断开 S 时，阶梯波完成一个重复周期。开关 S 周期性闭合即可得到周期性的阶梯波。

### 6.5.3 晶体管特性图示仪的使用

#### 1. XJ4810 型晶体管特性图示仪的面板结构

图 6.26 为 XJ4810 型晶体管特性图示仪前面板结构图，各开关旋钮的作用如下：

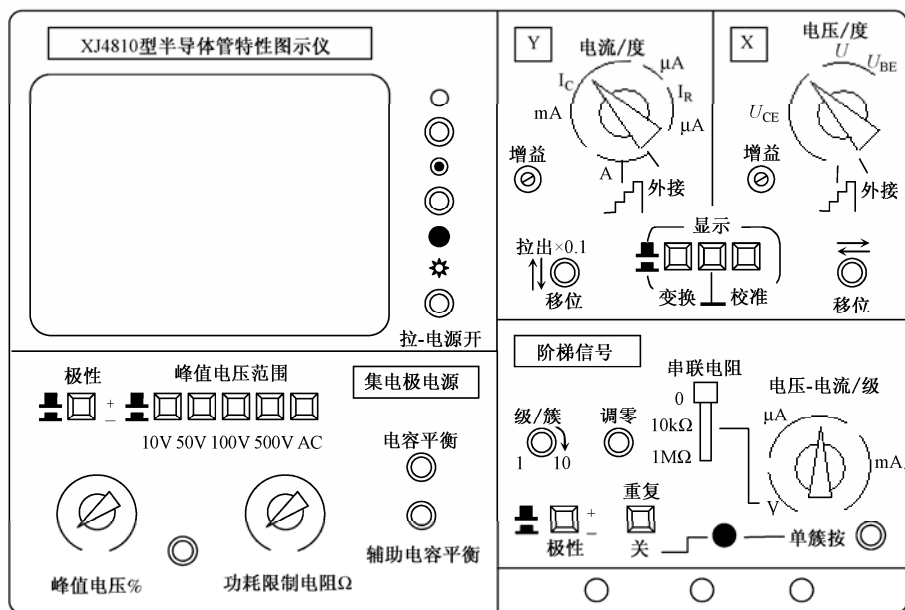


图 6.26 XJ4810 型晶体管图示仪前面板结构图

#### (1) 电源及示波管控制部分

电源及示波管控制部分包括：聚焦、辅助聚焦、辉度及电源开关，各自的使用方法与示波器的相似。

#### (2) 集电极电源

##### 1) “峰值电压范围”选择开关

“峰值电压范围”选择开关用于选择集电极电源最大值。其中 AC 挡能使集电极电源变为双向扫描，使屏幕同时显示出被测二极管的正、反方向特性曲线。当电压由低挡换向高挡时，应先将“峰值电压%”旋钮旋至 0。

##### 2) “峰值电压%”旋钮

调节“峰值电压%”旋钮可使集电极电源在确定的峰值电压范围内连续变化。

##### 3) “+、-”极性选择开关

按下“+、-”极性选择开关时集电极电源极性为负，弹起时为正。

##### 4) “电容平衡”、“辅助电容平衡”旋钮

当 Y 轴为较高电流灵敏度时，调节两旋钮使仪器内部容性电流最小，使荧光屏上的水平线基本重叠为一条。一般情况下无需调节。




### 5) “功耗限制电阻”旋钮

“功耗限制电阻”旋钮用于改变集电极回路电阻的大小。测量被测管的正向特性时应置于低电阻挡, 测量反向特性时应置于高电阻挡。

### (3) Y 轴部分

#### 1) “电流/度”旋钮

“电流/度”旋钮是测量二极管反向漏电流  $I_R$  及三极管集电极电流  $I_C$  的量程开关。当旋钮置于“” (该挡称为基极电流或基极源电压) 位置时, 可使屏幕 Y 轴代表基极电流或电压; 当旋钮置于“外接”时, Y 轴系统处于外接收状态, 外输入端位于仪器左侧面。

#### 2) “移位”旋钮


“移位”旋钮除作垂直移位外, 还兼作倍率开关, 当旋钮拉出时, 指示灯亮, Y 轴偏转灵敏度变为原来的 1/10。

#### 3) “增益”旋钮

“增益”旋钮用于调整 Y 轴放大器的总增益, 即 Y 轴偏转灵敏度。一般情况下无需经常调整。

### (4) X 轴部分

#### 1) “电压/度”旋钮

“电压/度”旋钮是集电极电压  $U_{CE}$  及基极电压  $U_{BE}$  的量程开关。当旋钮置于“”位置时, 可使屏幕 X 轴代表基极电流或电压; 当旋钮置于“外接”时, X 轴系统处于外接收状态, 外输入端位于仪器左侧面。

#### 2) “增益”电位器

“增益”电位器用于调整 X 轴放大器的总增益, 即 X 轴偏转灵敏度。一般情况下无需经常调整。

### (5) 显示部分

#### 1) “变换”选择开关

“变换”选择开关用于同时变换集电极电源及阶梯信号的极性, 以简化 NPN 型管或 PNP 型管测试时的操作。

#### 2) “ $\perp$ ”按键开关

按下“ $\perp$ ”按键开关时, 可使 X 和 Y 放大器的输入端同时接地, 以确定零基准点。

#### 3) “校准”按键开关

“校准”按键开关用于校准 X 轴及 Y 轴放大器增益。按键按下时, 在荧光屏有刻度的范围内, 亮点应自左下角准确地跳至右上角, 否则应调节 X 轴或 Y 轴的增益旋钮来校准。

### (6) 阶梯信号

#### 1) “电压-电流/级”旋钮

“电压-电流/级”旋钮即阶梯信号选择开关, 用于确定每级阶梯的电压值或电流值。

#### 2) “串联电阻”开关

“串联电阻”开关用于改变阶梯信号与被测管输入端之间所串接的电阻大小, 但只有当电压-电流/级开关置于电压挡时, 本开关才起作用。

#### 3) “级/簇”旋钮

“级/簇”旋钮用于调节阶梯信号一个周期的级数, 可在 1~10 级之间连续调节。



#### 4) “调零”旋钮

“调零”旋钮用于调节阶梯信号起始级电平，正常时该级为零电平。

#### 5) “+，-”极性选择开关

“+，-”极性选择开关用于确定阶梯信号的极性。

#### 6) “重复-关”按键开关

当“重复-关”按键开关弹起时，阶梯信号重复出现，用做正常测试；当开关按下时，阶梯信号处于待触发状态。

#### 7) “单簇按”开关

“单簇按”开关与“重复-关”按键配合使用。当阶梯信号处于调节好的待触发状态时，按下该开关，指示灯亮，阶梯信号出现一次，然后又回至待触发状态。

#### (7) 测试台部分

图 6.27 所示为 XJ4810 型晶体管特性图示仪测试台面板图，各开关旋钮的作用如下：

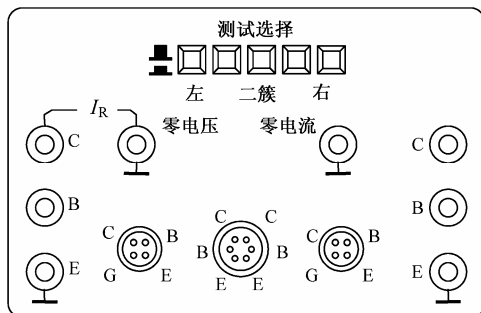


图 6.27 XJ4810 型晶体管特性图示仪测试台面板图

#### 1) “左”、“右”选择开关

“左”、“右”选择开关按下时，分别接通左边、右边的被测管。

#### 2) “二簇”选择开关

“二簇”选择开关按下时，图示仪自动交替接通左、右两只被测管，此时可同时观测到两管的特性曲线，以便对它们进行比较。

#### 3) “零电压”、“零电流”开关

“零电压”、“零电流”开关按下时，分别将被测管的基极接地、基极开路，后者用于测量  $I_{CEO}$ 、 $BU_{CEO}$  等参量。

## 2. XJ4810 型晶体管特性图示仪的使用方法与注意事项

### (1) 使用方法

① 开启电源，指示灯亮，预热 15min 后使用。

② “调节辉度”、“聚焦”、“辅助聚焦”等旋钮，使屏幕上的亮点或线条清晰。

③ X、Y 灵敏度校准。将“峰值电压%”旋钮选为 0，屏幕上的亮点移至左下角，按下显示部分中的校准开关，此时亮点应准确地跳至右上角。否则，应调节 X 轴或 Y 轴的增益旋钮来校准。

④ 阶梯调零。当测试中要用到阶梯信号时，必须先进行阶梯调零，其过程如下：将阶梯信号及集电极电源均置于“+”极性，“电压/度”置于“1V/度”，“电流/度”置于“ $\square$ ”，“电



压-电流/级”置于“0.05V/级”，“重复-开关”置于重复，“级/簇”置于适中位置，“峰值电压范围”置于10V挡，调节“峰值电压%”旋钮使屏幕上的扫描线满度，然后按下“1”按键，观察此时亮点在屏幕上的位置，再将按键复位，调节调零旋钮使阶梯波起始级处于亮点位置，这样，阶梯信号的零电平即被校准。

## （2）注意事项

① 应特别注意“阶梯信号选择”、“功耗限制电阻”、“峰值电压范围”旋钮的使用，如果使用不当会损坏被测晶体管。

② 测试大功率晶体管和极限参数、过载参数时，应采用单簇阶梯信号，以防过载损坏被测器件。

③ 测试 MOS 型场效应管时，应注意不要使栅极悬空，以免感应电压过高击穿被测管。

④ 测试完毕后，使仪器复位，以防下次使用时因疏忽而损坏被测器件。此时应将“峰值电压范围”置于“(0~10V)挡”，“峰值电压%”旋到零位，阶梯信号选择开关置于关挡，“功耗限制电阻”置于10kΩ以上位置。

## 6.5.4 晶体管特性图示仪特性曲线测试举例

晶体管特性图示仪可直接测试晶体管各种组态的输出、输入特性以及各种参数的测量。这里仅介绍部分特性曲线的测试方法。

### 1. 二极管特性曲线的测试

二极管特性曲线的测试原理如图 6.28 所示。

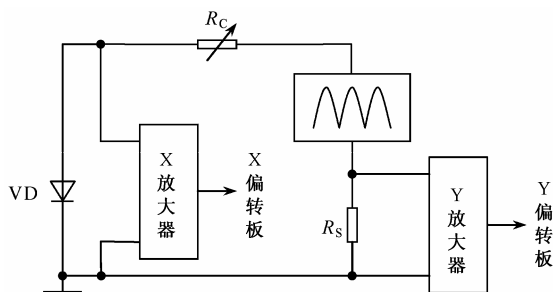


图 6.28 二极管特性曲线测试原理图

测试二极管时只需观察流过二极管的电流与二极管两端电压之间的关系，不必使用阶梯信号源。将二极管的极性和负极分别插入 C 和 E 两个接线端即可。测正向特性时加正极性扫描电压，测反向特性时加负极性扫描电压。集电极扫描电压接至 X 轴， $R_s$  上的取样电压接至 Y 轴，则可显示出相应的特性。为了能显示出二极管的正反向特性，把未扫描时的亮点调至显示屏的中心位置，扳动扫描电压极性开关则可分别显示出正反向特性曲线。新型的晶体管图示仪，集电极扫描电压有双向扫描功能，可使正反向特性曲线同时显示在荧光屏上。根据显示出的特性曲线，依据定义可测量出二极管的各种参数，如整流二极管的正向压降、反向电流，稳压管的稳定电压、动态电阻等。

### 2. 三极管特性曲线的测试

#### （1）三极管输出特性曲线测试

NPN 型三极管输出特性曲线测试原理如图 6.20 所示。选择集电极扫描电压、基极阶梯信



号的极性及其扫描电压的峰值电压范围，Y轴作用开关置于“集电极电流”某合适挡位，X轴作用开关置于“集电极电压”某合适挡位；基极接入连续阶梯波（或脉冲阶梯波），“阶梯选择”置于阶梯电流某合适位置，“功耗限制电阻”选取合适数值，插入被测三极管，加大集电极扫描电压，即可显示出三极管共射输出特性曲线。

### (2) 三极管输入特性曲线的测试

三极管输入特性曲线的测试原理如图 6.29 所示。此时被测管的集电极仍接全波整流扫描电压，基极接入连续阶梯（或脉冲阶梯）信号，二者极性由被测管管型确定，Y轴作用开关置于“基极电流或基极源电压”，X轴作用开关置于“基极电压”某合适挡位，阶梯电流  $i_B$  及扫描电压  $u_{CE}$  的调节方法同上。

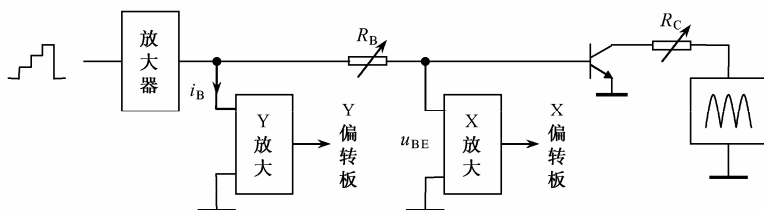


图 6.29 晶体三极管输入特性曲线测试原理图

PNP 型三极管特性曲线测试时，集电极电源极性、阶梯极性为负极性，与测试 NPN 型三极管时的极性相反。

## 3. 场效应管特性曲线的测试

### (1) 漏极特性曲线的测试

测试时，将场效应管的漏极、栅极和源极分别插入 C，B，E 接线端。场效应管  $i_D$  和  $u_{DS}$  的选择与一般晶体管的  $i_C$ 、 $u_{CE}$  相似，如图 6.30 所示。

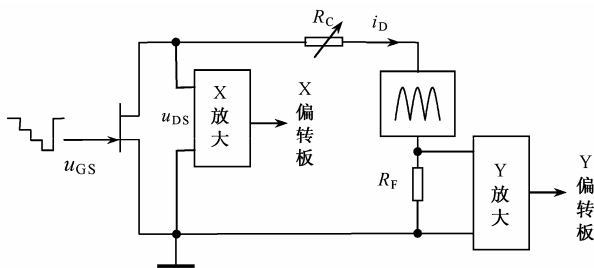


图 6.30 场效应管漏极特性曲线测试原理图

### (2) 场效应管转移特性曲线测试

用转移特性曲线测量场效应管的夹断电压  $U_P$ 、饱和漏极电流  $I_{DSS}$  与跨导  $g_m$  比较直观。将 X 放大器接到栅极（即“电压/度”置于“ $u_{BE}$ ”挡），如图 6.31 所示。由于阶梯电压加在 X 轴方向，在屏幕上形成许多上端有亮点的竖线，如图 6.32 所示。由亮点连接起来的曲线即为转移特性曲线。该曲线与 X 轴的交点所对应的  $U_{GS}$  为夹断电压  $U_P$ ，曲线的斜率为跨导  $g_m$ ，曲线与 Y 轴交点所对应的  $i_D$  为漏极饱和电流  $I_{DSS}$ 。

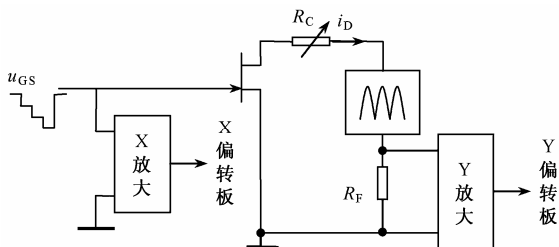


图 6.31 场效应管转移特性曲线测试原理图

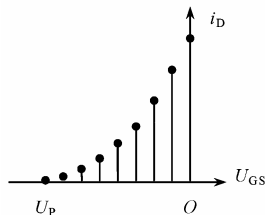


图 6.32 场效应管转移特性曲线图



## 本章小结

本章主要介绍伏安法、电桥法、谐振法等集中参数元件的测量与仪器，以及晶体管特性曲线的测量方法与仪器，是电子元器件测量的基础知识。

(1) 电子元器件测量主要包括电阻、电容、电感、损耗因数、品质因数等集中参数的测量及晶体管特性参数的测量。低频状态下的电阻、电容、电感属于集中参数元件。

(2) 伏安法是根据欧姆定律测量集中元件参数的。测量精确度较差，仅适用于低频测量，一般用于测量直流电阻。

(3) 集中参数元件阻抗的数字化测量实质上属于阻抗-电压变换法测量。它利用正弦信号在被测阻抗两端产生交流电压，并对实部和虚部进行分离，最后利用电压的数字化测量来实现阻抗的测量。

(4) 电桥法是根据电桥平衡条件来测量的。所用仪器称为平衡电桥或电桥。电桥法适合低频阻抗元件的测量，电桥由桥体、零指示器、电源等部分组成。

(5) 电桥分为直流电桥和交流电桥，交流电桥又有臂比、臂乘电桥之分。臂比电桥适合测量电容，臂乘电桥比较适于测量电感。

(6) 不平衡电桥通过直接测量电桥非平衡状态下流经指示器的电流或两端电压大小测量集中参数元件。不平衡电桥易实现集中参数元件的快速数字化测量。

(7) 谐振法又称为  $Q$  表法，是依据  $LC$  谐振回路谐振特性进行测量的方法。谐振法适合测量高频元件。谐振法测量仪器称为  $Q$  表， $Q$  表由测量回路、信号源、耦合回路及  $Q$  值电压表等组成。

(8)  $Q$  表法测量电感、电容时一般采用替代法，要正确使用  $Q$  表。

(9) 晶体管特性图示仪是一种器件测量仪器，用来显示器件的特性曲线、测量  $\alpha$ 、 $\beta$  值等参数，主要由阶梯波发生器、集电极扫描信号源、测试变换电路和示波管等组成。



## 习题 6

1. 测量集中参数元件的方法有哪些？它们各有什么特点？各自的测量依据与适用场合是怎样的？
2. 伏安法有哪两种电路连接法？各自适合在什么情况下选用？如何实现伏安法数字化测量？
3. 不平衡电桥的测量原理是什么？与平衡电桥相比有什么特点？不平衡电桥能够实现集中参数元件的数字化测量吗？如果能实现数字化测量，谈谈如何实现？
4.  $Q$  表中的高频振荡器与测量回路之间的耦合形式有哪几种？什么是松耦合？
5. 谐振法测量电容和电感的方法有哪几种？



6. 替代法测电容的准确度与谐振频率、电感  $L$  及其分布参数有关吗？为什么？如何测量？
7.  $Q$  表的工作原理是什么？它由哪几部分组成？
8. 如何正确使用 QS-18A 型万用电桥？测量电感与电感品质因数以及电容与电容损耗因数时，被测量与仪器面板上开关旋钮的指示值之间有什么关系？
9. 怎样使用晶体管特性图示仪？如何显示二极管、三极管、场效应管等的特性曲线？
10. 晶体管特性图示仪的用途是什么？怎样使用？使用时应注意什么问题？
11. 图 6.9 (a) 所示的电桥测量线圈的电感量和品质因数，电桥对 1000Hz 的频率平衡，电路各元件的值为： $C_s=0.05\mu\text{F}$ 、 $R_s=10\text{k}\Omega$ 、 $R_1=5\text{k}\Omega$ 、 $R_2=2\text{k}\Omega$ ，求  $L_x$  和  $Q_x$ 。
12. 图 6.10 (a) 所示电桥测量电容器的容量及其损耗角正切时，电路的元件具有以下数值： $R_s=2\text{k}\Omega$ 、 $R_1=10\text{k}\Omega$ 、 $R_2=2\text{k}\Omega$ 、 $C_s=500\text{pF}$ 、 $f=1\text{kHz}$ ，求  $C_x$  及  $D_x$ 。
13. 分别指出图 6.33 所示四个电桥属于臂比、臂乘电桥中的哪一种，推导出被测元件参数表达式。

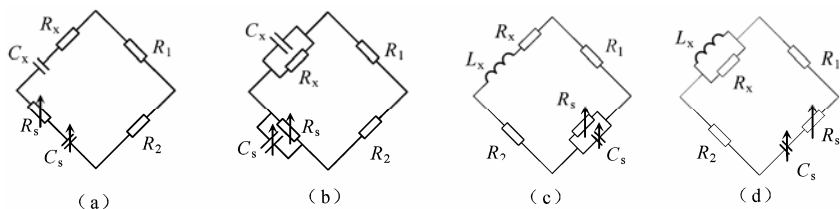


图 6.33 习题 6.13 图

14. 图 6.34 所示的几个电路，哪几个电路是正确的电桥桥体？为什么？

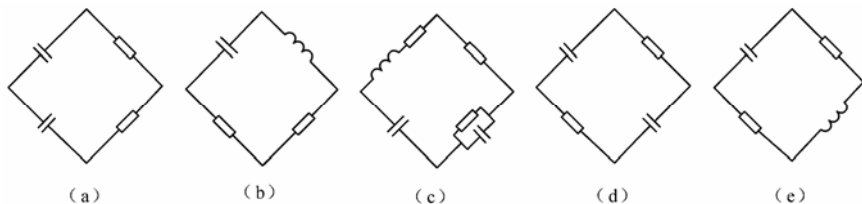


图 6.34 习题 6.14 图



# 第 7 章 频率和时间测量与仪器



**学习参考：**电子计数器可以测量频率、周期、时间等量，通过扩展还可以构成频率计、相位计，它是电子测量三大仪器之一。要求通过学习本章了解测频的方法、电子计数器的组成、性能指标，理解电子计数器的工作原理、掌握它的使用方法。

**本章要点：**通用电子计数器的组成、测量原理、测量误差的来源及减小措施，通用电子计数器的使用方法、扩频方法，数字相位计的工作原理。

## 7.1 概述

在相等时间间隔内重复发生的现象称为周期现象，该时间间隔称为周期。在单位时间内周期性过程重复的次数称为频率，用周期的倒数来表示，单位为赫兹（Hz）。频率和周期互为倒数，是最基本的参量之一。

按工作原理分类，测量频率的方法如表 7-1 所示。无源测频法又称为直读法，是利用电路的频率响应特性测量频率；比较法是利用已知的参考频率同被测频率进行比较而测得被测频率；电子计数器法是最常用的测频方法之一，它是利用电子计数器测量单位时间内被测信号周期个数来实现频率的测量，它实质上属于比较法。电子计数器是一种最常见、最基本的数字化测量仪器。电容充放电法是利用电子电路控制电容器充放电的次数，再用磁电式仪表测量充、放电电流的大小而测得被测信号频率。

表 7-1 频率测量方法

模拟法	无源测频法	谐振法
		电桥法
		频率—电压变换法
	比较法	拍频法
		差频法
		示波器法
计数法	电容充放电法	
	电子计数法	

### 7.1.1 无源测频法

无源测频法主要包括谐振法、电桥法和频率—电压变换法等方法。



## 1. 谐振法

图 7.1 所示为谐振法测频原理图。被测信号经互感  $M$  与  $LC$  串联谐振回路进行松耦合，改变可变电容器  $C$  可使回路发生串联谐振。谐振时回路电流  $I$  达到最大。被测频率  $f_x$  可用下式计算：

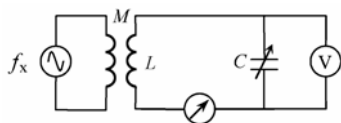


图 7.1 谐振法测频原理图

$$f_x = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7-1)$$

式中， $f_0$  为谐振回路的谐振频率； $L$ 、 $C$  分别为谐振回路谐振电感和谐振电容。

一般情况下， $L$  是预先设定的，可变电容采用标准电容。为了使用方便，可根据式 (7-1) 预先绘制配用相应电感的  $f_x$ - $C$  曲线，或  $f_x$ - $\theta$  ( $\theta$  为  $C$  的旋转角度) 曲线。测量时，调节标准电容使回路谐振，可从曲线上直接查出被测频率。

## 2. 电桥法

凡是平衡条件与频率有关的任何电桥都可用于测频，但要求电桥的频率特性尽可能尖锐，如图 7.2 (a) 所示。测频电桥的种类很多，常用的有文氏电桥、谐振电桥和双 T 电桥等。

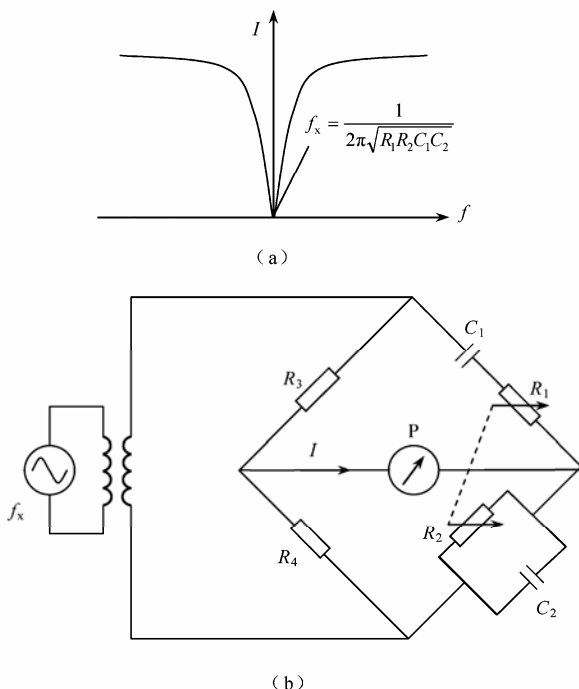


图 7.2 文氏电桥测频原理图

图 7.2 (b) 为文氏电桥法测频原理图。电桥的平衡条件为



$$(R_1 + \frac{1}{j\omega_x C_1})R_4 = (\frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega_x C_2})R_3$$

令等式两边实部和虚部分别相等，得

$$\omega_x = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

或

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

如果  $R_1=R_2=R$ ,  $C_1=C_2=C$ , 则  $f_x = \frac{1}{2\pi RC}$ , 借助  $R$  (或  $C$ ) 的调节, 可使电桥对被测频率  $f_x$  达到平衡, 故可变电阻  $R$  (或可变电容  $C$ ) 上可按频率进行标度。

### 3. 频率-电压变换法

频率-电压变换法测频是指先把频率变换为电压或电流, 然后以频率标度的电压表或电流表指示被测频率。图 7.3 (a) 为频率-电压变换法测量正弦波频率原理框图, 首先把正弦信号变换为频率与之相等的尖脉冲  $u_A(t)$ , 然后加至单稳多谐振荡器, 产生频率为  $f_x$ 、宽度为  $\tau$ 、幅度为  $U_m$  的矩形脉冲列  $u_B(t)$ , 如图 7.3 (b) 所示。经推导得知

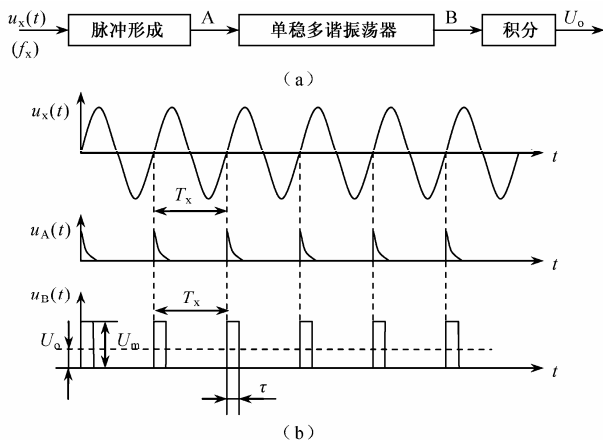


图 7.3 频率-电压变换法测频原理图

$$U_o = \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} u_B(t) dt = U_m \tau f_x$$

可见, 当  $U_m$ 、 $\tau$  一定时,  $U_o$  正比于  $f_x$ 。所以先经积分电路求  $u_B(t)$  的平均值  $U_o$ , 再由直流电压表指示即构成频率-电压变换型直读式频率计, 电压表可直接按频率标度。该频率计最高频率可达几兆赫。

#### 7.1.2 比较测频法

比较测频法主要包括拍频法和差频法。

##### 1. 拍频法

拍频法是将被测信号与标准信号经线性元件 (如耳机、电压表) 直接进行叠加而实现频



率测量,如图 7.4 所示。

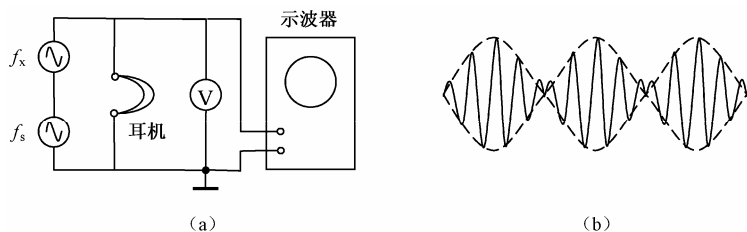


图 7.4 拍频法测频原理

当两个音频信号逐渐靠近时,耳机中可以听到两个高低不同的音调。当这两个信号的频率差值介于  $4\sim 6\text{Hz}$  时,就只能听到一个近于单一音调的声音,这时声音响度呈周期性变化,再观察电压表,会发现指针在有规律地来回摆动,示波器上将得到如图 7.4 (b) 所示的波形。声音响度变化的频率等于两个频率之差。当两个频率愈来愈接近时,声音的节拍越来越慢,当两个信号频率完全相等时,合成信号的强度保持不变,这时被测频率等于标准频率。

拍频法通常只用于音频测量,而不宜用于高频测量。

## 2. 差频法

高频段测频常用差频法测量。差频法是利用非线性器件和标准信号对被测信号进行差频变换来实现频率测量,如图 7.5 所示。 $f_x$  和  $f_s$  两个信号经混频器混频和滤波器滤波后输出二者的差频信号。当由低到高调整标准频率  $f_s$  使差频信号落在音频信号范围内时,耳机中听到的声音会由尖锐逐渐变得低沉而后消失;再继续调高  $f_s$  时,音调会由低逐渐变得尖锐而后重新消失,则耳机声音第一次消失时的标准频率  $f_s$  与被测信号频率  $f_x$  近似相等。

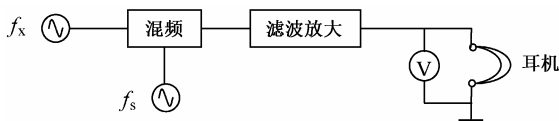


图 7.5 差频法测频原理

## 7.2 电子计数器概述

### 7.2.1 分类

按测试功能的不同,电子计数器分以下几类。

#### (1) 通用电子计数器

通用电子计数器即多功能电子计数器。它可以测量频率、频率比、周期、时间间隔及累加计数等量,通常还具有自检功能。

#### (2) 频率计数器

频率计数器是指专门用于测量高频和微波频率的电子计数器,它具有较宽的频率范围。

#### (3) 计算计数器

计算计数器是指一种带有微处理器、可进行数学运算和求解复杂方程式等功能的电子计数器。



#### （4）特种计数器

特种计数器是指具有特殊功能的电子计数器。如可逆计数器、预置计数器、程序计数器和差值计数器等，它们主要用于工业生产自动化领域，尤其在自动控制和自动测量方面。

本章主要讨论通用电子计数器。

### 7.2.2 基本组成

图 7.6 为通用电子计数器组成框图，主要由输入通道、计数显示电路、时基产生电路和逻辑控制电路等组成。

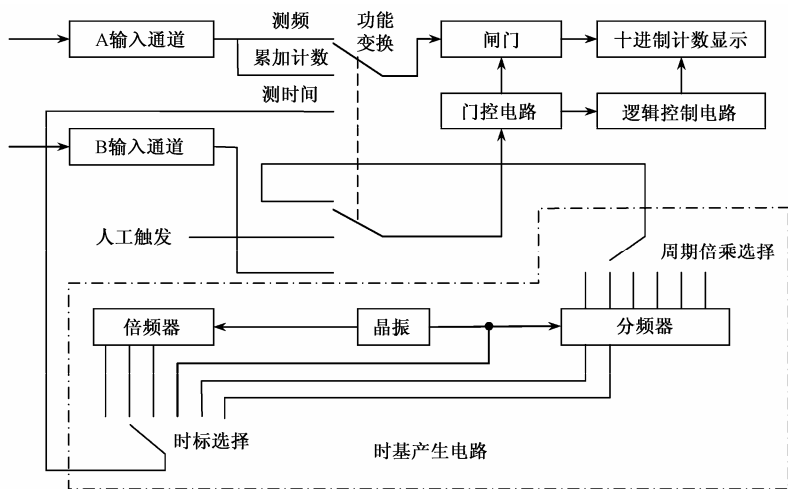


图 7.6 通用电子计数器的组成框图

#### （1）输入通道

输入通道即输入电路，用于接收被测信号，并对被测信号进行放大整形，然后送入闸门（即主门或信号门）。输入通道通常包括 A、B 两个独立的单元电路。

A 通道用于对输入信号进行放大整形、变换输出计数脉冲信号。当闸门开启时，计数脉冲信号经过闸门进入十进制计数器，是十进制计数器的触发脉冲源。当闸门关闭时，计数脉冲不能进入十进制计数器。

B 通道的输出用于控制闸门的开启和关闭。输入信号经整形后用于触发门控电路（双稳态触发器）使其状态翻转，以一个脉冲开启闸门，而以随后的一个脉冲关闭闸门，两脉冲的时间间隔为闸门开启时间。在此期间，十进制计数器对经过 A 通道的计数脉冲进行计数。为保证能够被一定电平的信号触发，输入端可以对触发电平进行连续调节，并且可以任意选择所需的触发脉冲极性。

#### （2）计数显示电路

计数显示电路是一个十进制计数显示电路，用于对通过闸门的脉冲进行计数，并以十进制数方式显示计数结果。

#### （3）时基产生电路

时基产生电路主要由晶振、分频器、倍频器和转换开关等组成。由石英晶体振荡器提供标准时间信号作为电子计数器的内部时间基准。测量周期（测周）时，标准时间信号经过放大整形和倍频（或分频），用作测量周期或时间的计数脉冲，称为时标信号；测频时，标准时



间信号经过放大整形和一系列分频得到控制门控电路的时基信号，时基信号经过门控电路形成门控信号。

#### (4) 逻辑控制电路

逻辑控制电路用于产生各种控制信号，用于控制电子计数器各单元电路的协调工作。测量的工作程序一般是：准备→计数→显示→复零→准备下次测量。

### 7.2.3 主要性能指标

#### 1. 测试功能

即仪器所具备的测试功能，如测频、测周等。

#### 2. 测量范围

测量范围即仪器的有效测量范围，如测频时的频率上限和下限，测周时的周期最大值和最小值。

#### 3. 输入特性

##### (1) 输入耦合方式

输入耦合方式有 AC 和 DC 两种方式。AC 耦合是指选择输入端交流成分加到电子计数器。DC 耦合即直接耦合，输入端信号直接加到电子计数器。

##### (2) 触发电平及其可调范围

B 通道和时基产生电路用于控制门控电路的工作状态，只有被测信号达到一定的触发电平时，门控电路的状态才能翻转，闸门才能适时地开启关闭，从而测出时间间隔等参量。因此，触发电平必须连续可调，且具备一定的可调范围。

##### (3) 输入灵敏度

输入灵敏度是指在保证仪器正常工作时输入的最小电压。

##### (4) 最高输入电压

最高输入电压即允许输入的最大电压，超过该电压仪器不能正常工作，甚至损坏。

##### (5) 输入阻抗

输入阻抗包括输入电阻和输入电容。

#### 4. 测量准确度

测量准确度常用测量误差来表示。

#### 5. 闸门时间和时标

闸门时间和时标由时基产生电路产生的信号决定。可以提供的闸门时间和时标信号有多种。

#### 6. 显示及工作方式

##### (1) 显示位数

显示位数是指可以显示的数字位数。

##### (2) 显示时间

显示时间是指两次测量之间显示结果的时间，一般可调。



### (3) 显示器件

显示器件是指显示测量结果或测量状态的器件，如数码管、发光管、液晶显示器等。

### (4) 显示方式

显示方式有记忆显示和非记忆显示两种方式。记忆显示只显示最终结果，不显示正在计数的过程，显示的数字是刚结束的一次测量的结果，显示数字保留至下一次计数过程结束时再刷新。非记忆显示方式时，还可显示正在计数的过程。

## 7. 输出

输出是指仪器可输出的时标信号种类、输出数码的编码方式及输出电平等级。

## 7.3 通用电子计数器的测量功能

### 7.3.1 测量频率

测量频率是指周期现象在单位时间内重复的次数，即

$$f=N/T$$

式中， $T$ 为时间，单位为s； $N$ 为在时间 $T$ 内周期现象的重复次数。

电子计数器测频原理框图如图7.7所示。被测信号经过放大整形得到重复频率为 $f_x$ 的计数脉冲，作为闸门的输入信号。门控电路输出的门控信号控制闸门的启闭，闸门开启时间等于分频器输出信号周期 $K_f T_s$ 。只有当闸门开启（图中假设门控信号为高电平）时，计数脉冲才能通过闸门进入十进制计数器去计数，设计数结果为 $N$ 。则存在关系：

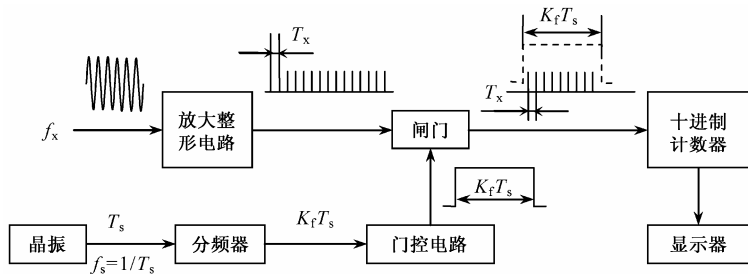


图 7.7 通用电子计数器测频原理框图

$$NT_x = \frac{N}{f_x} = K_f T_s$$

$$f_x = \frac{N}{K_f T_s}$$

$$N = K_f T_s f_x$$

如果被测信号经过放大整形后，再经过 $m$ 次倍频，则满足如下关系：

$$N \frac{T_x}{m} = \frac{N}{m f_x} = K_f T_s$$

$$f_x = \frac{N}{m K_f T_s}$$

$$N = m K_f T_s f_x$$



式中,  $N$  为闸门开启期间十进制计数器计出的计数脉冲个数;  $f_x$  为被测信号频率, 其倒数为周期  $T_x$ ;  $T_s$  为晶振信号周期;  $m$  为倍频次数;  $K_f$  为分频次数, 调节  $K_f$  的旋钮称为闸门时间选择开关, 其与  $T_s$  的乘积等于闸门时间。

为了使  $N$  值能够直接表示  $f_x$ , 常取  $mK_fT_s=1\text{ms}$ 、 $10\text{ms}$ 、 $0.1\text{s}$ 、 $1\text{s}$ 、 $10\text{s}$  等几种闸门时间。即当闸门时间为  $1\times 10^n\text{s}$  ( $n$  为整数), 并且使闸门开启时间的改变与计数器显示屏上小数点位置的移动同步时, 无需对计数结果进行换算就可直接读出测量结果。

### 7.3.2 测量周期

频率的倒数即周期, 电子计数器测量周期的原理与测频原理相似, 测量周期原理框图如图 7.8 所示。

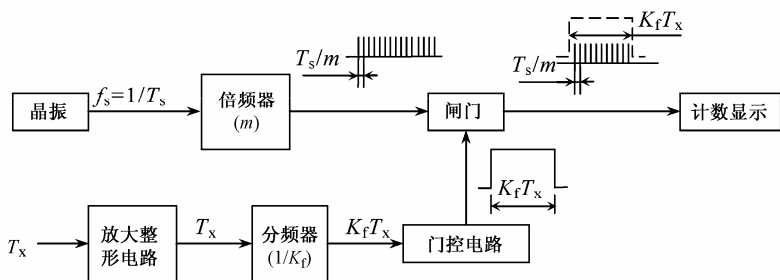


图 7.8 通用电子计数器测周原理框图

门控电路由经放大整形、分频后的被测信号控制, 计数脉冲是晶振信号经倍频后的时间标准信号 (即时标信号)。存在如下关系:

$$K_f T_x = N \frac{T_s}{m} = N \frac{1}{mf_s}$$

$$T_x = N \frac{1}{mK_f f_s} = \frac{NT_s}{mK_f}$$

$$N = mK_f T_x / T_s$$

式中,  $T_x$  与  $K_f$  的乘积等于闸门时间;  $K_f$  为分频器分频次数, 调节  $K_f$  的旋钮称为“周期倍选择”开关, 通常选用  $10^n$ , 如  $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 10^2$ 、 $\times 10^3$  等, 该方法称为多周期测量法;  $T_s$  为晶振信号周期,  $f_s$  为晶振信号频率;  $T_s/m$  通常选取为  $1\text{ms}$ 、 $1\mu\text{s}$ 、 $0.1\mu\text{s}$ 、 $10\text{ns}$  等, 改变  $T_s/m$  大小的旋钮称为“时标选择”开关。

由上述分析得知, 通用电子计数器无论是测频还是测周, 其测量方法是依据闸门时间等于计数脉冲周期与闸门开启时通过的计数脉冲个数之积, 然后根据被测量的定义进行推导计算而得出被测量的。同样道理, 也可以据此测量频率比、时间间隔等参量。

### 7.3.3 测量频率比

频率比即两个信号的频率之比, 电子计数器测量频率比的原理框图如图 7.9 所示, 其测量原理与测量频率的原理相似。不过此时有两个输入信号加到电子计数器输入端, 如果  $f_A > f_B$ , 就将频率为  $f_B$  的信号经 B 通道输入, 以控制闸门的启闭, 假设该信号未经分频器分频, 则闸门开启时间等于  $T_B (=1/f_B)$ ; 而把频率为  $f_A$  的信号从 A 通道输入, 假设该信号未经过分频, 设十进制计数器计数值为  $N$ , 则存在如下关系:



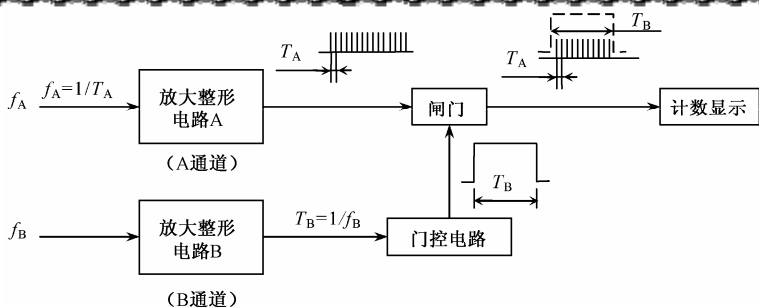


图 7.9 通用电子计数器测量频率比原理框图

$$T_B = NT_A$$

$$N = T_B/T_A = f_A/f_B$$

为了提高测量准确度，可以采用类似多周期测量的方法，在 B 通道增加分频器，对  $f_B$  进行  $K_f$  次分频，使闸门开启时间扩展  $K_f$  倍。则有：

$$K_f T_B = NT_A$$

$$f_A/f_B = T_B/T_A = N/K_f$$

当对  $f_A$  再进行  $m$  次倍频，用  $mf_A$  作为时标信号时，存在如下关系：

$$K_f T_B = NT_A/m$$

$$f_A/f_B = N/(mK_f)$$

### 7.3.4 测量累加计数

累加计数是指在限定时间内，对输入信号重复次数（即放大整形后的计数脉冲个数）进行累计。其工作原理与测量频率相似，不过此时门控电路改由人工控制。其电路原理框图如图 7.10 所示，当开关 S 打在“启动”位置时，闸门开启，计数脉冲进入计数器计数，当开关 S 打在“终止”位置时，闸门关闭，终止计数，累加计数结果由显示电路显示。

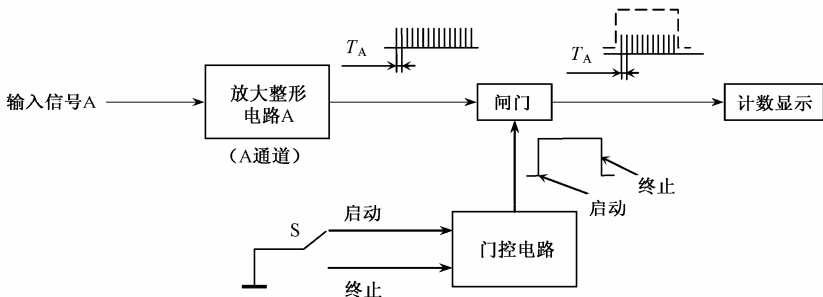


图 7.10 通用电子计数器累加计数原理框图

### 7.3.5 测量时间间隔

图 7.11 所示为测量时间间隔的原理框图，其测量原理与测量周期的原理相似，不过控制闸门启闭的是两个（或单个）输入信号在不同点产生的触发脉冲。触发脉冲的产生由触发器的触发电平与触发极性选择开关决定。

当测量两个信号的时间间隔时，开关  $S_1$  处于“单独”位置，测量原理如图 7.12 所示。



输入 A (设时间超前) 产生起始触发脉冲用于开启闸门, 使十进制计数器开始对时标信号进行计数; 输入 B (设时间滞后) 则产生终止触发脉冲以关闭闸门停止计数。假设触发器 1 和 2 的触发极性和触发电平分别为 A、B 信号的正极性 (即开关  $S_2$ 、 $S_3$  置于 “+” 处) 和电平的 50%, 计数值为  $N$ , 则时间间隔  $T_{AB}$  存在如下关系:

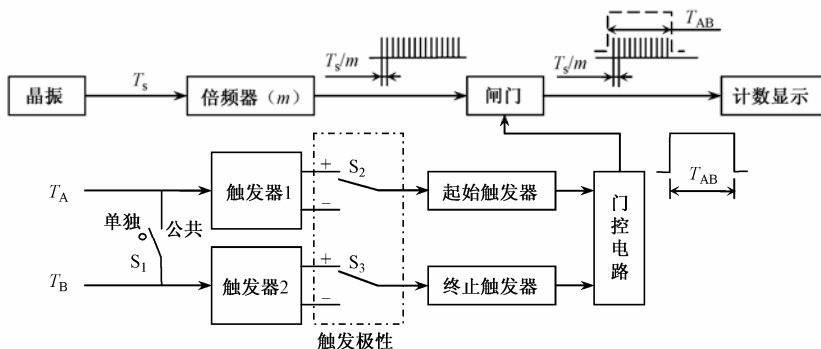


图 7.11 通用电子计数器测量时间间隔原理框图

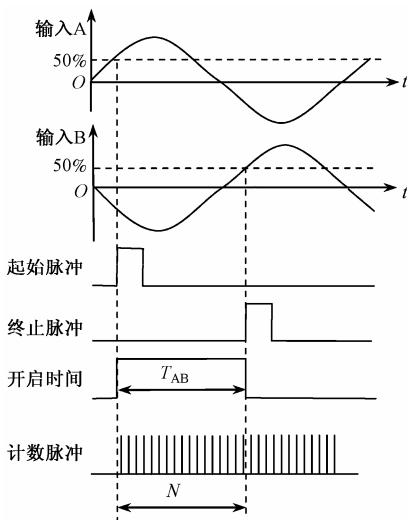


图 7.12 通用电子计数器测量时间间隔波形图

$$T_{AB} = N \frac{T_s}{m}$$

当测量脉冲信号的时间间隔如脉冲前沿  $t_r$ 、脉宽  $\tau$  等参数时, 将开关  $S_1$  置于 “公共” 位置, 根据被测量的定义, 调节触发器 1 和 2 的触发电平和触发极性, 选择合适的时标信号, 即可测量。例如测量脉宽  $\tau$  时, 根据脉宽定义, 调节触发器 1 和 2 的触发电平均为 50%,  $S_1$  和  $S_2$  的触发极性选择分别调节为 “+”, “-”。闸门开启期间计数结果为  $N$ , 则

$$\tau = NT_s/m$$

### 7.3.6 自检 (自校)

大多数电子计数器具有自检 (即自校) 功能, 它可以检查仪器自身的逻辑功能及电路的工作状态, 其原理框图如图 7.13 所示。

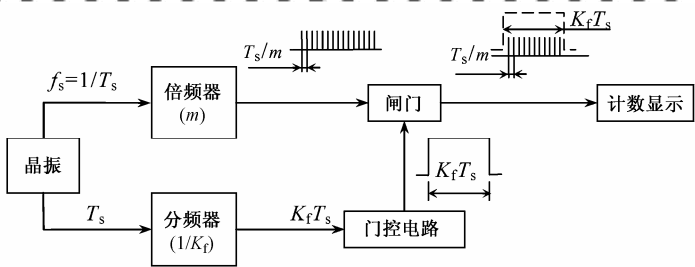


图 7.13 通用电子计数器自检原理框图

由图 7.13 可知，自检原理与测量频率的原理相似，不过自检时的计数脉冲不再是被测信号而是晶振信号经倍频后产生的时标信号。显然，只要满足关系：

$$NT_s/m = K_f T_s$$
$$N = mK_f$$

或

$$N = mK_f \pm 1$$

就说明电子计数器的工作基本正常，之所以出现 $\pm 1$ ，是因为存在量化误差的缘故。

## 7.4 电子计数器的测量误差

### 7.4.1 测量误差的来源

电子计数器的测量误差来源主要包括量化误差、触发误差和标准频率误差。

#### 1. 量化误差

量化误差是在将模拟量变换为数字量的量化过程中，由于电子计数器闸门的开启与计数脉冲的输入在时间上具有不确定性，即相位随机性而产生的误差。量化误差是数字化仪器所特有的误差，是不能被消除的误差。如图 7.14 所示，虽然闸门开启时间均为  $T$ ，但因为闸门开启时刻不一样，计数值一个为 9 另一个却为 8，两个计数值相差 1 个字。

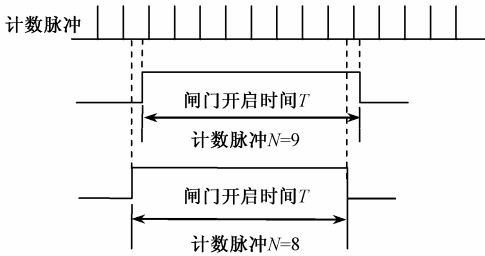


图 7.14 量化误差产生示意图

量化误差的特点是：无论计数值  $N$  为多少，每次的计数值总是相差 $\pm 1$ ，即 $\Delta N = \pm 1$ 。因此，量化误差又称为 $\pm 1$ 误差或 $\pm 1$ 字误差。又因为量化误差是在对计数脉冲的计数过程中产生的，故又称为计数误差。



量化误差的相对误差为

$$\gamma_N = \frac{\Delta N}{N} \times 100\% = \pm \frac{1}{N} \times 100\%$$

## 2. 触发误差

触发误差又称为变换误差。被测信号在整形过程中, 由于整形电路本身触发电平的抖动或者被测信号叠加有噪声和各种干扰信号等原因, 使得整形后的脉冲周期不等于被测信号的周期, 由此而产生的误差称为触发误差。

门控电路一般采用施密特触发器。如图 7.15 所示, 当被测信号达到施密特触发器触发电平  $V_B$  时 (即  $A_1$  点), 门控信号控制闸门开启; 当被测信号经过一个周期 (设被测信号未被分频) 再次达到施密特触发器触发电平  $V_B$  时 (即  $A_2$  点), 门控信号控制闸门关闭。显然, 当无噪声和干扰信号的理想情况下, 闸门开启时间等于被测信号的周期  $T_x$ ; 但叠加有噪声或干扰信号时, 闸门在  $A_1'$  即开启, 而在  $A_2'$  时才关闭, 闸门的开启时间为  $T_x'$ , 不再等于被测信号的周期, 由此而产生触发误差。

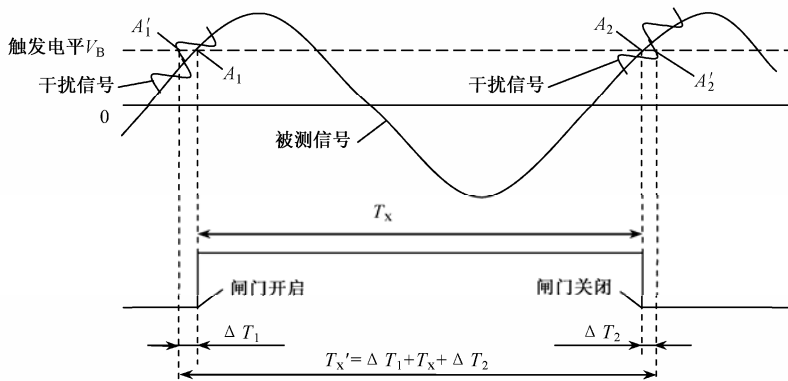


图 7.15 触发误差产生示意图

显然, 当触发电平产生抖动, 也即图 7.15 中触发电平虚线变成曲线时, 也会产生触发误差。

经推导得知, 触发误差的相对误差等于:

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \frac{U_n}{\sqrt{2\pi K_f} U_m} \quad (7-2)$$

式中,  $U_n$  为噪声或干扰信号的最大幅度, 包括因触发电平抖动而产生的影响, 一般情况下, 可以不考虑触发电平抖动的影响;  $U_m$  为被测信号电压幅度;  $K_f$  为 B 通道分频器分频次数。

触发误差对测量周期的影响较大, 而对测量频率的影响较小, 所以测频时一般不考虑触发误差的影响。这是因为测频时用来产生门控信号的是标准的晶振信号, 叠加的干扰信号很小, 故可以忽略触发误差的影响; 而产生计数脉冲的被测信号中虽然有干扰信号, 但不影响对计数脉冲的计数, 故不产生触发误差。

为了减小测周时触发误差的影响, 除了尽量提高被测信号的信噪比外, 还可以采用多周期测量法测量周期, 即增大 B 通道分频器分频次数。因为采用多周期测量法可以抵消相邻周期所产生的触发误差, 而能够对测量结果产生影响的仅是第一个周期开始时和最后一个周期



终了时产生的触发误差, 求平均后的触发误差将显著减小。

### 3. 标准频率误差 $\Delta f_s/f_s$

标准频率误差是指由于晶振信号的不稳定等原因而产生的误差。测频时, 晶振信号用来产生门控信号(即时基信号), 标准频率误差称为时基误差; 测周时, 晶振信号用来产生时标信号, 标准频率误差称为时标误差。一般情况下, 由于标准频率误差较小, 不予考虑。

## 7.4.2 测量误差的分析

上述测量误差中, 对频率测量影响最大的是量化误差, 其他误差一般不予考虑。周期测量则主要受量化误差和触发误差的影响。下面对测频和测周误差进行分析。

### 1. 测频误差

经过推导得知, 测频量化误差等于:

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \frac{1}{N} = \pm \frac{1}{mK_f T_s f_x}$$

由此可见, 要减小量化误差对测频的影响, 应设法增大计数值  $N$ 。即在 A 通道中选用倍频次数  $m$  较大的倍频器, 亦即选用短时标信号; 在 B 通道中增大分频次数  $K_f$ , 亦即延长闸门时间; 可以直接测量高频信号的频率, 或者, 测出周期后再进行换算, 称之为间接测量法。这是由测周误差的特性所决定的。

### 2. 测周误差

#### (1) 量化误差

经过推导得知, 测周量化误差为

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \pm \frac{1}{N} = \pm \frac{1}{mK_f f_s T_x}$$

由此可见, 要减小测周量化误差, 应设法增大计数值  $N$ 。即在 A 通道中选用倍频次数  $m$  较大的倍频器, 亦即选用短时标信号; 在 B 通道中增大分频次数  $K_f$ , 亦即延长闸门时间; 可以直接测量低频信号的周期, 或者, 测出频率后再进行换算该方法称为多周期测量法。除此之外, 人们还常采用游标法、内插法等方法减小测量误差。

所谓的高频或低频是相对于电子计数器的中界频率而言的。中界频率是指采用测频和测周两种方法进行测量, 产生大小相等的量化误差时的被测信号频率。

#### (2) 触发误差

减小测周触发误差的方法如式(7-2)结论所述, 不再赘述。

综上所述, 多周期测量法以及提高信噪比、选用短时标信号等方法, 可以减小测量周期的误差。

## 7.4.3 频率扩展技术

由于受十进制计数器处理速度等因素的限制, 通用电子计数器比较适合测量低于 700MHz 的信号。通常采用外差降频变换法、预定标法、转移振荡器法、谐波外差变换法、取样法等方法来扩展计数器的测频范围, 此类计数器可测量高达 170GHz 的信号频率, 称之为数字频率计。以下主要介绍外差降频变换法和预定标法。



## 1. 外差降频变换法

图 7.16 所示为手动外差降频变换法扩频原理框图, 它的输入信号与调谐滤波器的输出混频后产生差频信号, 该差频信号频率刚好落在计数电路频率范围内而获得频率读数。调谐滤波器将谐波倍频器输出的每一谐波选出后, 作为混频的本振信号。为确定输入频率, 使用者只需将计数器的读数加上调谐滤波器的读盘指示值即可。

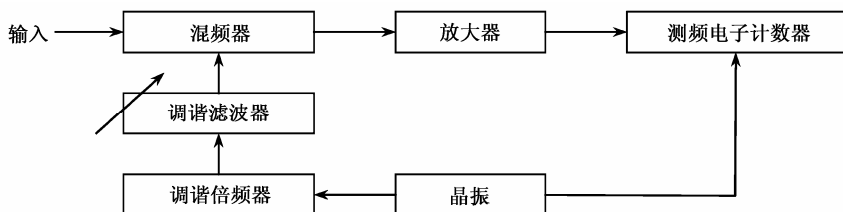


图 7.16 手动外差降频变换法扩频原理框图

现代计数器通常采用自动外差降频变换法。例如, 国营大华无线电仪器厂生产的 DH3381 型微波频率计数器、美国 EIP 公司生产的一些微波测频仪器等。

## 2. 预定标法

如图 7.17 所示, 预定标数字频率计与通用计数器的区别是对被测信号进行  $N$  分频, 即预定标后再测量。预定标法的缺点是降低了单位时间内的分辨力, 为了提高测量分辨力, 如果在十进制计数器位数足够多的情况下, 通常也对晶振进行  $K_f$  分频。

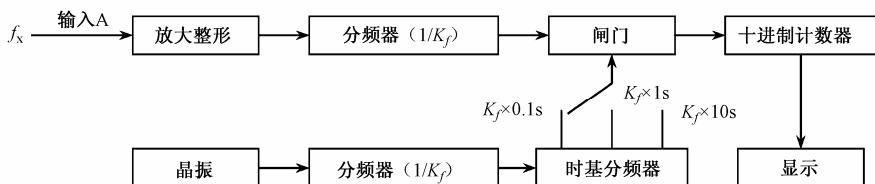


图 7.17 预定标法数字频率计原理框图

采用预定标法, 计数器测频上限可达 3GHz, 如南京电讯仪器厂生产的 E327A 通用计数器、E3397 型频率计数器等。

现代电子计数器中采用频率扩展技术的很多, 事实证明是行之有效的。例如, 使用 E312A 型频率扩展器时, 其测频上限范围可由 10MHz 扩展至 105MHz, E3122A 型可扩展至 500MHz, E3123A 型可扩展至 1000MHz。

## 7.5 通用计数器实例

NFC-100 型多功能电子计数器是一种采用大规模集成电路的通用电子计数器, 能够在适当的逻辑控制下完成频率和时间等的测量。

### 7.5.1 性能指标

#### (1) 测试功能

具有测频、测周、累加计数、自检等功能。



## （2）测量范围

测频范围：0.1Hz~100MHz；测周范围：0.4 $\mu$ s~10s；累加计数范围：1~10<sup>8</sup>。

## （3）输入特性

输入耦合方式：AC；输入电压范围：30mV~10V，但不同量程的计数的输入电压范围不同；输入阻抗： $R_i \geq 1M\Omega$ ； $C_i \leq 30pF$ 。

## （4）闸门时间

10ms、0.1s、1s、10s。

## （5）时标（晶振）

时标信号周期为 0.1 $\mu$ s。

## （6）显示位数及显示器件

显示位数及显示器件为 8 位 LED。

## （7）输出

输出频率：10MHz；输出波形：正弦波；输出电压 $\geq 1V_{P-P}$ 。

# 7.5.2 工作原理

NFC-100 型多功能电子计数器主要由输入通道、预定标分频器、主机测量单元、晶振和电源等部分组成，如图 7.18 所示。

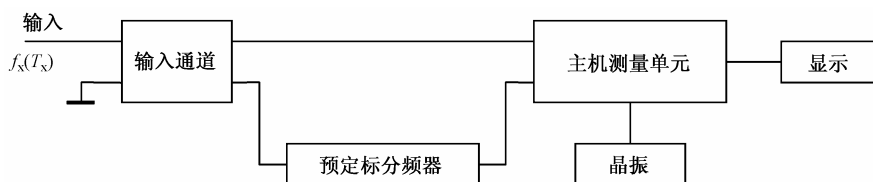


图 7.18 NFC-100 型通用电子计数器组成框图

主机测量单元直接计数频率为 10MHz，在输入高于 10MHz 以上信号频率时，需要经过预定标分频器 10 分频后，送入主机测量单元。测量周期、累加计数时，输入信号经输入通道放大整形后，直接进入主机测量单元，预定标分频器不起作用。

主机测量单元由大规模集成电路 ICM7226B 等组成，如图 7.19 所示。ICM7226B 内包含多位计数器、寄存器电路、时基电路、逻辑控制电路以及显示译码驱动电路、溢出和消隐电路，可直接驱动外接的共阴极 LED 显示数码管，以扫描方式显示测量结果。

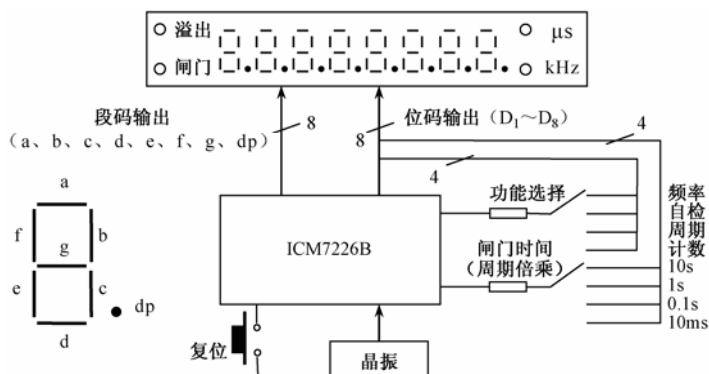


图 7.19 NFC-100 型电子计数器主机测量单元逻辑框图



当 ICM7226B 功能输入端和闸门时间输入端分别接入不同的扫描位脉冲信号时,其测量逻辑功能发生变化,分别完成“频率”、“周期”、“计数”、“自检”等功能。闸门时间在时标为 10MHz 时为 10ms, 0.1s, 1s, 10s, 在其他时标时, 闸门时间将随之作相应变化。

### 7.5.3 电子计数器的使用及注意事项

NFC-100 型电子计数器的前面板如图 7.20 所示。

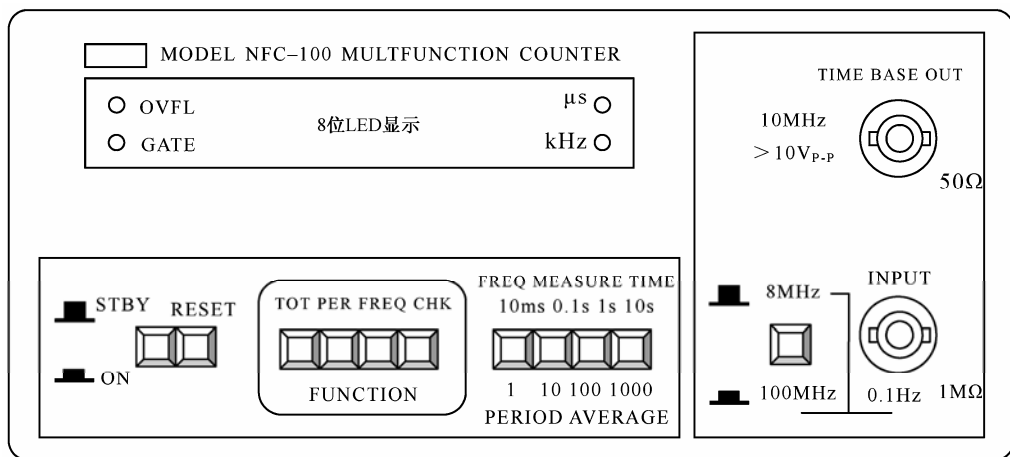


图 7.20 NFC-100 型电子计数器前面板图

“功能键 (FUNCTION)”包括“累加计数 (TOT, Totality)”、“周期 (PER, Period)”、“频率 (FREQ, Frequency)”、“自检 (CHK, Check)”四个按键,每个按键对应一种测量功能。功能键右边的四个按键在测量频率、周期时,分别称为“时基 (FREQ MEASURE TIME) 选择”、“周期倍乘 (PERIOD AVERAGE) 选择”开关,用于选择测频时的闸门时间和测周时对被测信号的分频次数,二者与被测量的范围配合使用。

使用注意事项:

- ① 按照要求接入正确的电源。
- ② 在使用电子计数器进行测量之前,应对仪器进行自检,以初步判断仪器工作是否正常。
- ③ 被测信号的大小必须在电子计数器允许的范围内。否则,若输入信号太小,将测不出被测量;若输入信号太大,则有可能损坏仪器。
- ④ 当“溢出 (OVFL)”指示灯亮时,表明测量结果显示有溢出,不能漏记数字。
- ⑤ 在允许的情况下,尽可能使显示结果精确些,即所选闸门时间应长一些。
- ⑥ 在测量频率时,如果选用闸门时间为 10s 时,“闸门 (GATE)” (或“采样”)指示灯熄灭前显示的数值是前次的测量结果,并非本次测量结果,记录数据时务必在采样指示灯变暗后进行。

## 7.6 数字相位计

相位差的测量方法包括示波器法、比较法、直读法等。数字相位计采用直读法测量,数字相位计包括相位-时间变换式相位计和相位-电压变换式相位计,瞬时值数字相位计和平均值数字相位计均属于前者。瞬时值数字相位计和平均值数字相位计是由电子计数器功能扩展





得到的相位测量仪器。

## 7.6.1 瞬时值数字相位计

瞬时值数字相位计原理框图如图 7.21 所示。当被测信号  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  由负变正通过零点时, 分别由零比较器 1 和 2 产生脉冲信号  $u_1'(t)$  和  $u_2'(t)$ 。设  $u_1(t)$  超前于  $u_2(t)$ , 则  $u_1'(t)$  和  $u_2'(t)$  分别用作门控电路的开启信号、关闭信号, 使门控电路产生门控信号  $u_3(t)$ 。 $u_3(t)$  的脉宽与两个信号的相位差相对应,  $u_3(t)$  脉宽期间开启闸门, 时标信号经由闸门至计数显示电路得到对应的相位差值。其工作波形如图 7.22 所示。

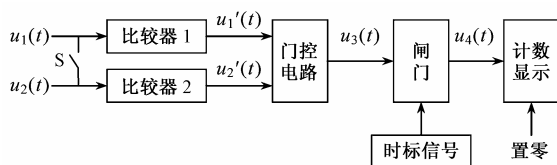


图 7.21 瞬时值数字相位计原理框图

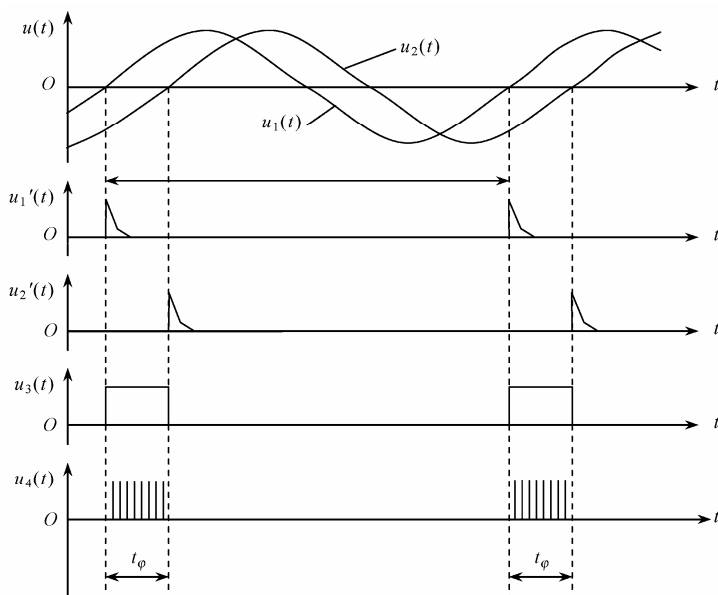


图 7.22 瞬时值数字相位计工作波形图

设被测信号周期为  $T_x$ , 门控信号  $u_3(t)$  的宽度即两个信号相位差  $\Delta\varphi$  对应的时间为  $t_\varphi$ , 则

$$\frac{t_\varphi}{T_x} = \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} \quad (7-3)$$

$$t_\varphi = NT_s \quad (7-4)$$

式中,  $T_s$  为时标信号周期。

由式 (7-3)、式 (7-4) 得

$$\Delta\varphi = \frac{NT_s}{T_x} \times 360^\circ = N \frac{f_x}{f_s} \times 360^\circ = \frac{N}{M} \times 360^\circ \quad (7-5)$$

$$M = \frac{f_s}{f_x} = \frac{T_x}{T_s}$$



由此可见,瞬时值数字相位计是将相位差变换为时间后进行测量的,属于相位-时间变换式数字相位计;测量两个信号的相位差时,必须事先确定出  $M$  值。为此,闭合图 7.21 中开关  $S$  将两个通道的输入端并联,输入其中的一个信号用于产生门控信号,仍用  $f_s$  作时标信号,由计数器测得  $M$  值,根据式 (7-5) 可以计算出两个信号的相位差。

BX-14 型数字相位计就是一种工作频率范围为  $1\sim 1000\text{MHz}$  的瞬时值数字相位计。

### 7.6.2 平均值数字相位计

平均值数字相位计是在瞬时值数字相位计的基础上,采用平均技术而构成的数字相位计,它能够减小干扰信号、量化误差等的不良影响,提高测量的准确度。其原理框图及工作波形如图 7.23 和图 7.24 所示。

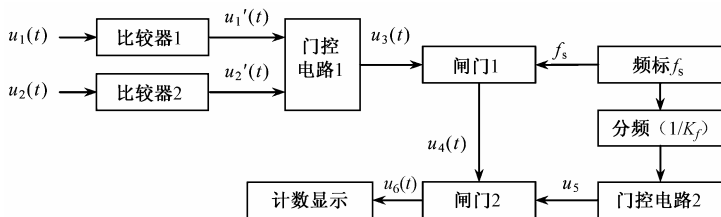


图 7.23 平均值数字相位计原理框图

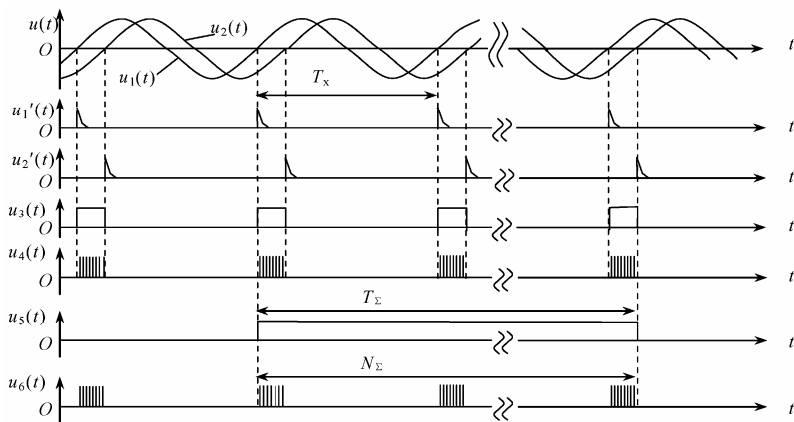


图 7.24 平均值数字相位计工作波形图

闸门 1 的工作过程与瞬时值数字相位计完全相同,存在如下关系:

$$\Delta\varphi = \frac{T_s}{T_x} \times N \times 360^\circ$$

门控信号  $u_5(t)$  是利用频标信号  $f_s$  分频得到的。分频系数为  $K_f$ , 其门控周期  $T_\Sigma$  为

$$T_\Sigma = \frac{1}{\frac{f_s}{K_f}} = K_f T_s$$

对应于被测信号的每个周期  $T_x$ , 闸门 1 输出一组脉冲, 设闸门 2 每开启一次通过  $m$  组脉冲、每组脉冲的脉冲个数为  $N_i$ , 则存在如下关系:

$$T_\Sigma = m T_x = K_f T_s$$



$$K_f = mT_x/T_s$$

在时间  $T_s$  内, 对通过闸门 2 的  $m$  组脉冲计数, 并求平均值  $\bar{N}$ , 则有

$$\bar{N} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m N_i$$

用平均值  $\bar{N}$  代替式 (7-5) 中的  $N$  计算相位差, 则存在如下关系:

$$\Delta\varphi = \frac{T_s}{T_x} \cdot \bar{N} \times 360^\circ = \frac{T_s}{T_x} \cdot \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m N_i \times 360^\circ = \frac{N_\Sigma}{K_f} \times 360^\circ$$

$$N_\Sigma = \sum_{i=1}^m N_i$$

式中,  $N_\Sigma$  是在  $T$  时间内实际通过闸门 2 的脉冲总数;  $K_f$  为分频次数, 可由分频器的分频指示值读出。

相位差  $\Delta\varphi$  与  $N_\Sigma$  成正比, 计数值  $N_\Sigma$  能直接用来表示测量结果。平均值数字相位计的测量结果只决定于计数值  $N_\Sigma$ , 而与被测频率  $f_x$  无关。为了便于读数, 通常  $K_f$  选用  $36 \times 10^n$ ,  $N_\Sigma$  则可以直接表示相位差, 只是小数点位置要随取值的不同而产生移位。

在实际工作中, 平均值数字相位计应用比较广泛, 如 BX-13A 型数字相位计等。BX-13A 型数字相位计工作频率为 20Hz~200kHz, 测相位范围为  $0 \sim 360^\circ$ , 分辨力为  $\pm 0.03^\circ$ 。



## 本章小结

本章主要介绍通用电子计数器的组成原理与测量误差, 以及电子计数器应用的推广——数字相位计的组成原理等。

- (1) 频率测量方法包括无源测频法、比较法和计数法等。
- (2) 电子计数器分为通用电子计数器、频率计数器 (即数字频率计) 和计算计数器等。
- (3) 通用电子计数器由输入通道、计数显示电路、时基产生电路和逻辑控制电路等组成, 它具有测量频率、频率比、周期、时间间隔、累加计数以及自检等功能。其测量原理是闸门开启时间等于计数脉冲周期与计数脉冲计数值之积。
- (4) 在通用电子计数器的基础上, 通过预定标法、外差降频变换等方法可以扩展计数器的测频范围, 称之为数字频率计。
- (5) 相位的测量可以变换为时间的测量, 因此瞬时值、平均值数字相位计测量相位的实质是电子计数器功能的扩展。平均值数字相位计的抗干扰能力强、量化误差影响小、测量准确度高、使用方便。



## 习题 7

1. 通用电子计数器的测量功能有哪些? 简要说明它的测量原理。
2. 通用电子计数器测量频率、周期时主要存在哪些误差? 如何减小这些误差? 为什么在测频时不考虑触发误差的影响?
3. 用 7 位电子计数器测量  $f_x=20\text{MHz}$  的信号频率。当闸门时间置于 1s、0.1s、10ms 时, 试分别计算电子计数器测频时的量化误差?
4. 简述数字相位计的测量原理, 并说明它与电子计数器之间有什么联系?



5. 用电子计数器测量频率，已知闸门时间和计数值  $N$  如表 7-2 所示，求  $f_x$  各为多少？

表 7-2 5 题用表

$T$	10s	1s	0.1s	10ms	1ms
$N$	2000000	200000	20000	2000	200
$f_x$					

6. 电子计数器多周期法测量周期。已知被测信号重复周期为 5ms，计数值为 200000，内部时标信号频率为 1MHz。保持电子计数器状态不变，测量另一未知信号，已知计数值为 20000，求被测信号的周期是多少？

7. 要用电子计数器测量一个  $f_x=1\text{kHz}$  的信号，采用测频（选闸门时间为 10s）和测周（选时标 0.1ms）两种方法，试比较两种方法由量化误差产生的测量误差。

# 第 8 章 数据域测量与仪器



**学习参考：**逻辑分析仪是数据域测量的主要工具，常用于数字系统的故障检测、定位与诊断，以及数据流的检测与显示。本章主要介绍数据域测量技术及逻辑分析仪的组成原理与应用。要求通过学习掌握数据域测试方法，了解逻辑笔、逻辑分析仪的组成及应用，熟悉逻辑分析仪的工作原理。

**本章要点：**数据域测试方法，逻辑分析仪的触发方式与显示方式，逻辑笔与逻辑分析仪的应用。

## 8.1 数据域测量的基本概念

传统时域测量仪器对模拟电路与系统的测试是行之有效的，但对于数字电路与系统的测试却未必奏效，甚至完全无能为力。这是由数据域测量的特点所决定的。

### 8.1.1 数据域测量的特点

数据域测量面向的测量对象是数字电路。数字电路以二进制数“0”和“1”表示信息。在每一特定时刻，多位 0, 1 数字的组合称为一个数据字，数据字随时间的变化按一定的时序关系形成数据流。因此，数据域测量就是对数据流的测量。

数据域测量的内容包括数字系统或设备的故障检测、故障定位、故障诊断以及数据流的检测和显示。运行正常的数字系统或设备的数据流是正确的；如果数据流发生错误，则说明系统或设备存在故障。因此，只要检测出输入与输出的对应数据流关系，即可明确系统功能是否正常、是否存在故障，并确定出故障的范围。

### 8.1.2 数字信号与数字系统的特点

数字系统以数据或数据字作为时间或时序的函数，具有以下特点。

#### (1) 数字信号是非周期性的

数字系统或设备按一定的时序工作。在执行一个程序时，许多信号只出现一次，或者仅在关键时刻出现一次（如中断事件）；某些信号虽然可能会重复出现，但并非是时域内的周期信号，如子程序的调用。因此，数据域测量应能捕获单次信号和非周期信号。

#### (2) 数字信号是按时序传输的

数字系统或设备具有一定的逻辑功能，系统中的信号是有序的数据流，各信号之间具有严格的时序关系。因此，数据域测量应能分析各种信号的时序和逻辑关系，并能捕获单次信号和非周期信号。例如，程序的执行必须在规定的控制信号作用下，取出指令代码，进行译码，并发出完成该指令的控制信号。



### (3) 数字信号是多通道传输的

一个字符、一个数据、一个指令或地址是由多位数据 (bit) 组成的。因此, 数据域测量仪器应具有多个输入通道, 每个器件都与总线相接, 如同“悬挂”在总线上 (即“挂”在总线上), 每个器件按照一定的时序脉冲工作。

### (4) 数字信息的传输方式多种多样

数字信号是脉冲信号, 数字信息则用高低电平的组合来表示。数字信息可以以串行方式 (bit) 或并行方式 (byte) 传输, 也可以同步传输或异步传输。并行传输比串行传输的信息传输速度快, 但所需的硬件较多。串行传输一般应用于远距离数据传输。由于总线是复用的, 因此, 数据域测试应能进行电平判别, 确定信号在电路中的建立时间和保持时间, 并注意设备结构、数据格式和数据的选择, 应能够从大量的数据流中捕获有分析意义的数

### (5) 数字信号的变化速度较快

高速运行的主机和低速运行的外部设备等数字设备或系统数字信号的变化速度很大, 因此, 数据域测量仪器应能采集不同速度的数据。

### (6) 数字系统的故障判别与模拟系统不同

模拟系统的故障主要根据电路中某些节点的电压或波形来判别, 而数字系统中的故障判别往往依据信号间的时序和逻辑关系是否正常来判别。造成数字系统出错的数据常混在正确的数据流中, 有时发现故障时产生故障的原因早已过去。因此, 在检测与判别故障时, 既要分析出错后的信息状态, 又要捕获出错前的信息状态。

## 8.1.3 数据域测试仪器设备

数据域测试的目的是: 判别数字电路或系统中是否存在故障, 即故障的诊断; 确定故障在电路或系统中的位置, 即故障的定位。用于数据域测试的仪器和设备包括以下几种。

### (1) 万用表和数字电压表

万用表和数字电压表常用来测量数字电路或系统中各种模拟量的大小, 例如, D/A 变换器的输出、A/D 变换器的输入等。

### (2) 逻辑笔和逻辑夹

逻辑笔和逻辑夹常用于测试简单数字电路的状态, 即测出电路某一点的状态是高电平、低电平, 还是脉冲。逻辑夹可测得多路信号电平。

### (3) 逻辑脉冲发生器 (LG, Logic Generator)

逻辑脉冲发生器的外形与逻辑笔相似, 能够产生数字电路所需的不同宽度、幅度及频率的逻辑脉冲信号。

### (4) 逻辑分析仪

逻辑分析仪是多线示波器与数字存储技术发展的产物, 故又称为逻辑示波器。它能够对逻辑电路、甚至包括软件等逻辑状态进行记录和显示, 实现对逻辑系统的分析。

### (5) 示波器

示波器也是数字电路或系统调试及维修的常用测试仪器, 用于测试脉冲的各种参数与信号幅度, 比较输入信号的波形、相位、幅度及其相互关系。多通道的示波器与特征分析仪、逻辑分析仪一起常被用来测试数字系统的动态特性。



8.1.4 逻辑笔和逻辑夹

1. 逻辑笔

逻辑笔具有结构简单、使用方便的特点，特别适合测试一般门电路和触发器的逻辑关系。图 8.1 所示为逻辑笔的外形结构图，顶端两个红绿灯用于指示数字电路某一端点的逻辑状态，红灯亮表示是逻辑“1”（高电平），绿灯亮表示是逻辑“0”（低电平）。逻辑笔对被测点逻辑状态的响应如表 8-1 所示。

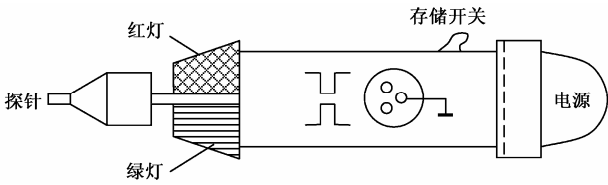


图 8.1 逻辑笔外形结构图

表 8-1 逻辑笔的测试响应

被测点逻辑状态	逻辑笔响应
稳定的逻辑“1”状态（+2.4~+5V）	红灯稳定亮
稳定的逻辑“0”状态（0~+0.7V）	绿灯稳定亮
在逻辑“1”与“0”中间状态（+0.8~+2.3V）	两灯均不亮
单次正脉冲	绿→红→绿
单次负脉冲	红→绿→红
低频率列脉冲	红绿灯交替闪烁

为了便于记录被测点的状态，逻辑笔具有记忆功能。当测试某点为高电平时，红灯点亮，如果此时将逻辑笔移开测试点，红灯仍继续亮。当不需要记录此状态时，可扳动逻辑笔上的存储开关使其复位。

逻辑笔腰部的两个插孔可以各自提供一个正、负选通脉冲，将其中一个插孔与被测电路的某一选通点相接，逻辑笔将随着选通脉冲的加入而作出响应，图 8.2 所示是在  $t_0$  时刻提供负选通脉冲时，逻辑笔响应为高电平、红灯亮的情况。

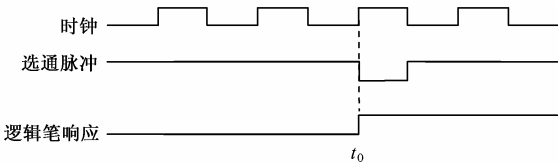


图 8.2 选通脉冲的作用

图 8.3 所示为逻辑笔的组成框图。被测点的逻辑状态由探针接入，电平检测器对信号电平与基准电压进行比较，选择与该信号对应的“0”电平通道或“1”电平通道进行脉冲展宽，进入判“0”判“1”网络（门电路），指示灯驱动器使对应颜色的指示灯点亮。若输入为中间电平，则不进入任何一路，指示灯不亮。

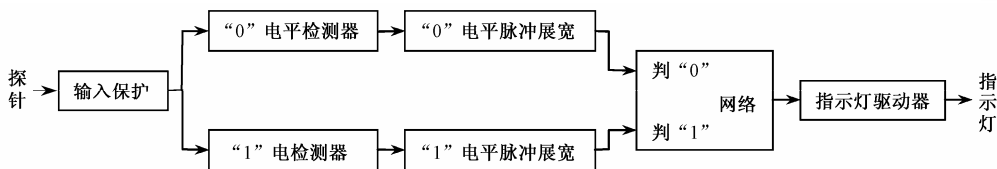


图 8.3 逻辑笔电路框图

## 2. 逻辑夹

逻辑笔在同一时刻只能显示一个被测点的状态，而逻辑夹可以同时显示多个端点的逻辑状态。图 8.4 所示为某其中一路输入信号的电路结构图，该逻辑夹共有 16 路输入信号，每一路的电路结构相同。每个端点信号均通过一个门判电路和非门输出驱动发光二极管的信号，当输入信号为高电平时，发光二极管点亮。

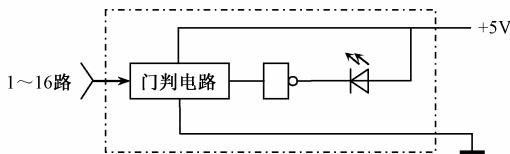


图 8.4 逻辑夹的 1 路电路结构图

逻辑夹与逻辑脉冲发生器配合使用，可以快速查找出数字电路的逻辑故障。当逻辑脉冲发生器的信号频率较低时，逻辑夹可以较清楚地反映出门电路、触发器、计数器或加法器等全部输入端、输出端之间的逻辑关系。

## 8.2 数据域测试技术

### 8.2.1 数字电路的简易测试

数字电路的测试任务就是确认数字电路电平的高低是否符合逻辑值的规定、逻辑关系是否正确，当输入变化时，电路翻转是否正确。通常规定正逻辑时的“1”为高电平，“0”为低电平；负逻辑时相反。

示波器、逻辑笔和逻辑脉冲发生器等仪器一般用于测试简单数字电路，例如，分立元件、中小规模集成电路、简单数字设备等。对于很简单的数字电路，可以利用小灯泡或发光二极管 LED 的亮暗以及蜂鸣器发声强弱检测被测电平的高低、逻辑“1”、逻辑“0”以及脉冲的有无等。

### 8.2.2 数据域测试方法

数据域测试的方法包括穷举测试法、伪穷举测试法和随机测试法。

#### (1) 穷举测试法

图 8.5 所示为穷举测试法示意图，图中穷举测试矢量产生电路用来产生被测电路所需的所有可能的组合信号。穷举测试法的实质是对被测电路输入所有可能的组合信号，然后测试与每一种输入组合信号相对应的全部输出是否正确。如果所有输入信号、输出信号的逻辑关系是正确的，则被测电路就是正确的；反之，被测电路就是错误的。最后根据比较结果给出





“合格/失效”的指示。



图 8.5 穷举测试示意图

穷举测试法的优点是能测试出存在的全部故障，即故障覆盖率为 100%。缺点是测试时间较长，并随输入端数量的增加呈指数规律增加。

### （2）伪穷举测试法

伪穷举测试法是把一个大电路划分成多个子电路，对每个子电路进行穷举测试。该方法可以节省大量的测试时间。

### （3）随机测试法

用随机测试矢量产生电路代替图 8.5 中的穷举测试矢量产生电路，以产生随机的组合数据流序列，同时输入给被测电路和已知功能完好的参考电路；然后对被测电路和参考电路的输出进行比较；最后根据比较结果给出“合格/失效”的指示。

随机测试法一般很难达到 100% 的故障覆盖率，常用于测试要求不高的场合。

## 8.2.3 故障类型、故障测试及故障定位

对于大规模集成电路、复杂的印制电路板、微型计算机系统等复杂数字逻辑系统的测试，除了涉及测试方法之外，还涉及到故障类型、故障测试、故障定位及测试数据流产生等问题。以下主要介绍故障类型、故障测试及故障定位。

### （1）故障类型

数字电路的故障类型一般分为物理故障和逻辑故障。由数字电路内部连线断开或短接、元器件不良等原因产生的故障称为物理故障。由数字电路内部逻辑控制不正确产生的故障称为逻辑故障，例如由于程序流程不正确而产生的故障。另外，不随时间改变的故障称为固定性故障或永久故障；时隐时现的故障称为间发故障或间歇故障。目前，数字电路的故障诊断多限于固定性的逻辑故障。

### （2）故障测试与故障定位

当一个数字电路实现的逻辑功能与无故障电路所实现的逻辑功能不同时，就说明该电路存在故障。因此，根据这个原理来对数字电路进行故障测试与检测。故障测试包括部件测试和整机测试两种，前者是对单元电路的测试，而后者是对整个系统的测试。

故障测试的基本方法包括静态测试和动态测试两种。静态测试是指不加输入信号或加固定电位时的测试，以判断电路各点电位是否正确，该方法主要用于检测物理故障，根据有问题的电位点，可将故障定位于某个器件。动态测试是在输入端输入各种可能的组合数据流，通过测试输出数据流的情况来判断输出逻辑功能是否正确，该方法主要用于检测复杂数字系统的逻辑故障。另外，物理故障也可以产生逻辑功能的错误，因此，动态测试既可检测系统的逻辑故障，又可检测系统的物理故障，并最终将检测出的故障定位于一定范围内。



## 8.3 逻辑分析仪

逻辑分析仪（LA，Logic Analyzer）是以单通道或多通道实时获取与触发事件相关的逻辑信号，并显示触发事件前后所获取的信号供软件及硬件分析的一种仪器。它能够用表格、波形或图形等形式显示，具有多个变量的数字系统的状态，也能用汇编形式显示数字系统软件，从而实现对数字系统硬件和软件的测试。

### 8.3.1 逻辑分析仪的分类

逻辑分析仪包括逻辑状态分析仪和逻辑定时分析仪。逻辑状态分析仪（LSA，Logic State Analyzer）以二进制数、十六进制数或 ASCII 码等状态显示被测逻辑状态，由被测系统提供采集数据的时钟脉冲，侧重于软件分析。逻辑定时分析仪（LTA，Logic Timer Analyzer）采用与示波器同样的方式显示信息，水平轴代表时间，垂直轴代表电压幅度，并由自身提供采集数据的时钟脉冲，主要用于硬件分析。

目前，逻辑分析仪通常具有逻辑状态分析和逻辑定时分析的功能，已被广泛应用于数字集成电路、印制板系统、微处理器系统等数字系统的测试中。

### 8.3.2 逻辑分析仪的组成

逻辑分析仪的基本组成如图 8.6 所示，CRT 为阴极射线示波管。

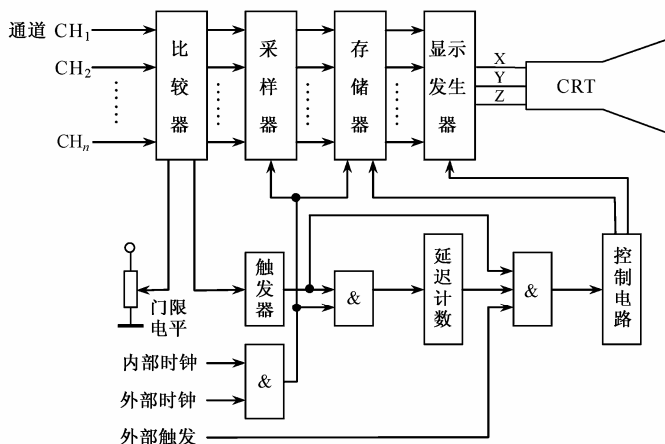


图 8.6 逻辑分析仪的组成框图

被测信号经过输入探头形成并行数据送至比较器，当输入信号大于门限电平时，比较器在相应的线上输出整形后的高电平信号；反之，输出低电平信号。

比较器的输出信号送至采样器与触发器。采样器在内部时钟或外部时钟脉冲控制下对其输入信号进行采样。采样信息按顺序、以“先进先出”的原则存放在存储器内。如果存储器已存满数据但尚未要求显示，存储器将自动舍弃旧数据，装入新数据。在满足触发条件的情况下，由触发器产生的脉冲用于启动或结束数据的采样与存储。当要求显示存储器存储的信息时，显示发生器在控制电路的控制下按照先后顺序逐一读出信息，并形成 X、Y、Z 三个轴向的模拟信号，最终由 CRT 按设定的显示方式加以显示。



### 8.3.3 逻辑分析仪的触发方式

逻辑分析仪可以同时采集多路信号，以便于对被测系统正常运行的数据流逻辑状态和各信号间的相互关系进行观测和分析。为了便于在较小的存储容量范围内采集和存储所需观测点前后变化的波形，逻辑分析仪设有多种触发方式。

触发指的是由一个事件来控制逻辑分析仪的数据获取，即选择观察窗口的位置。此事件可以是数据流中出现的一个数据字、数据字序列或其组合、某一个通道信号出现的某种状态、毛刺等。以某一通道状态作为触发条件的称为通道触发，即当选择的通道出现状态“1”或“0”时触发。以毛刺作为触发条件的称为毛刺触发，即在信号中出现毛刺时触发。毛刺是指在相继的时钟采样脉冲之间瞬间通过门限电压两次或多次的信号，它是非固有的偶尔发生的瞬态过程信号。以数据字作为触发条件的称为字触发，即当数据流中出现该触发字时触发，该数据字称为触发字。字触发是逻辑分析仪特有的，也是最常用的触发方式。常见的字触发方式有以下几种。

#### （1）组合触发

逻辑分析仪具有多通道信号组合触发（即“字识别”）功能。当输入数据与设定触发字一致时，产生触发脉冲。每一个输入通道都有一个触发字选择设置开关，每个开关有三种触发条件：1、0和x，“1”表示高电平，“0”表示低电平，“x”表示任意值。例如，某逻辑分析仪有4个通道，如果触发字设为10x1，则在4个输入数据通道中出现1001或1011时都会产生触发，如图8.7所示。组合触发方式又称为基本字触发方式，是逻辑分析仪最基本的字触发方式。

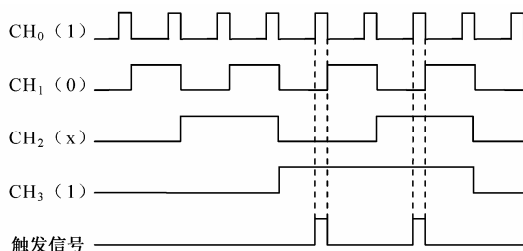


图 8.7 四通道组合触发实例

采用何种触发跟踪方式控制数据的采集过程将会影响到窗口的定位。通常把采集并显示数据的一次过程称为跟踪。最基本的触发跟踪方式有触发起始跟踪和触发终止跟踪。

触发起始跟踪是指触发时即开始数据的采集和存储，直到存储器满为止，所以触发字位于窗口的开始位置，如图8.8（a）所示。触发终止跟踪是指触发时即停止数据的采集，触发前一直采集并存储数据，如果存储器满时仍未触发，则在存入最新数据的同时清除最早存储的数据，即存储器采用先进先出（FIFO，First In First Out）的形式，如图8.8（b）所示。

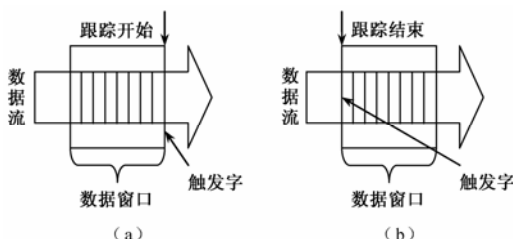


图 8.8 逻辑分析仪的基本触发跟踪方式

(2) 延迟触发

延迟触发是在数据流中搜索到触发字时，并不立即跟踪，而是延迟一定数量的数据后才开始或停止存储数据，它可以改变触发字与数据窗口的相对位置，如图 8.9 所示。图 8.9 (a) 为触发起始跟踪延迟方式，图 8.9 (b) 为触发终止跟踪延迟方式。设置延迟触发方式不同的延迟数，可以将窗口灵活定位在数据流中不同的位置。

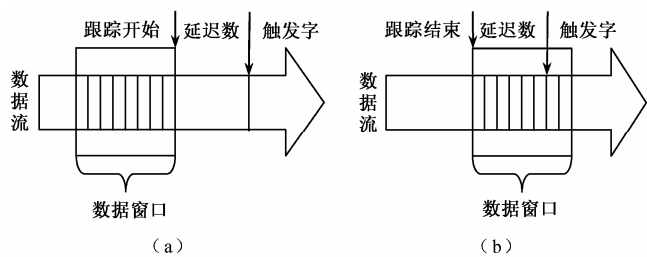


图 8.9 逻辑分析仪的延迟触发方式

触发起始跟踪延迟后，触发字出现后并不立即跟踪，而是延迟时间到后才开始存储数据，因此数据窗口中是触发字出现并延迟一段时间后的数据，触发字位于窗口外面。而触发终止跟踪延迟后，如果适当设置延迟数，可以使触发字位于数据窗口中任何位置。

(3) 限定触发

限定触发是对设置的触发字再加限定条件的触发方式。如果选定的触发字在数据流中出现较为频繁，为了有选择地捕获特定的数据流，可以给触发字附加一些约束条件。这样，即使数据流中频繁出现触发字，只要这些附加条件未出现，也不能进行触发，如图 8.10 所示。

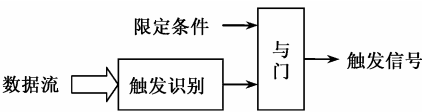


图 8.10 限定条件触发产生原理

(4) 序列触发

序列触发的触发条件是多个触发字的序列，它是当数据流中按顺序出现各个触发字时才触发，即顺序在前的触发字必须出现，后面的触发字才有效。序列触发常用于复杂分支程序的跟踪。

在两级序列触发中，第一级触发字为导引条件，当数据流中出现第一级触发字后，如果数据流中出现第二级触发字才能触发。如果在导引条件未满足前，出现第二级触发字并不触发，如图 8.11 (a) 所示。图 8.11 (b) 中将子程序入口作为导引条件（第一级触发字），子程序返回主程序作为触发条件（第二级触发字），这样可以把窗口准确定位在经过子程序的通路上。

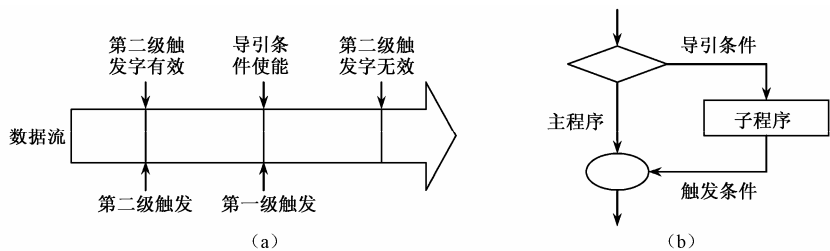


图 8.11 序列触发



有的逻辑分析仪还具有计数触发、手动触发等方式。计数触发方式通过在逻辑分析仪触发逻辑中设立的“遍数计数器”对软件系统中出现的嵌套循环次数进行统计，从而实现针对某次需要观察的循环的跟踪，而对其他各次循环并不进行跟踪。利用手动产生触发信号，可以在任何时刻加以触发。

8.3.4 逻辑分析仪的显示方式

逻辑分析仪将被测信号用数字形式写入存储器后，测量者可以根据需要通过控制电路将内存中的部分或全部数据稳定地显示在荧光屏上。逻辑分析仪具有以下几种显示方式。

（1）波形显示

波形显示方式是定时分析最基本的显示方式，它将各通道采集的数据按通道以伪方波形式显示在荧光屏上，如果某一采样时刻采得的数据为“1”，则显示为高，为“0”则显示为低，多个通道的波形可以同时显示，如图 8.12 所示。由于显示的不是被测点信号的实际波形，而只是代表采样时刻信号的状态，故称之为伪方波。波形显示方式可以很方便地显示出信号的时序关系，并可以将存储器内容按顺序或改变顺序显示。

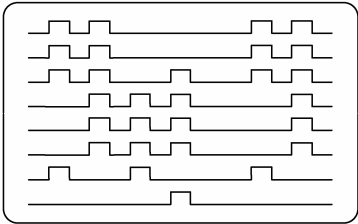


图 8.12 波形显示图

（2）数据列表显示

数据列表显示方式是指将存储器内容以二进制、八进制、十进制或十六进制数等各种数制形式显示在荧光屏上，如表 8-2 所示。表 8-2 将每个探头的数据按照采样顺序以十六进制数方式显示出来，移动光标可以观察捕获的所有数据，方便地观测分析被测系统的数据流。

表 8-2 数据列表显示方式

	探头 A1	探头 A2	探头 B1	探头 B2
0	08	08	00	00
1	08	08	00	00
2	09	03	00	00
3	07	07	00	00
4	06	06	00	00
5	06	06	00	00
6	07	07	00	00
7	05	05	00	00
8	04	04	00	00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

(3) 反汇编显示

对计算机系统进行测试分析，特别是对软件测试时，采用观察数据列表显示的方式极不方便。反汇编显示方式是指将采集到的总线数据（指令的机器码）按照被测的微处理器系统的指令系统进行反汇编，然后将反汇编得到的汇编程序显示出来，从而更方便地观察指令数据流，分析程序运行情况。表 8-3 是将某微机系统总线数据采集后，按照其指令系统反汇编的结果。

表 8-3 反汇编显示

地址 (HEX)	数据 (HEX)	操作码	操作数 (HEX)
2000	214220	LD	HL, 2042H
2003	0604	LD	B, 04H
2005	97	SUB	A
2006	23	INC	HL
⋮	⋮	⋮	⋮

(4) 图解显示方式

图解显示方式是指将荧光屏 X 和 Y 方向分别作为时间轴、数据轴进行显示的一种方式。它将要显示的数字量通过 D/A 变换器变换成模拟量，按照存储器中取出数字量的先后顺序将此模拟量显示在荧光屏上，形成一个图像的点阵。

图 8.13 显示的是一个简单 BCD 计数器的工作图形，BCD 计数器由全零状态（0000）开始工作，来一个时钟脉冲计数值增加 1，计数状态变化的数字序列为：0000→0001→0010→0011→0100→0101→0110→0111→1000→1001→0000，10 个计数脉冲后输出回到零，开始新一轮循环。经 D/A 变换后的亮点每次增加 1，即形成由左下方开始向右上方移动的 10 个亮点，当由 1001→0000 时，亮点回到显示器底部，如此循环往复。图解显示方式可用于检查一个带有大量子程序的程序执行情况，图 8.14 所示为一程序执行时，对微机地址总线进行检测并将检测数据图解显示所得的波形。

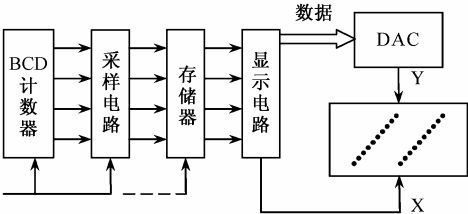


图 8.13 BCD 计数器图解显示

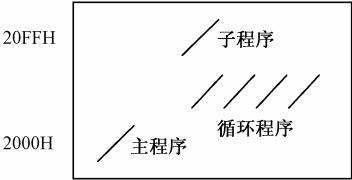


图 8.14 程序执行的图解显示



图解显示对观察程序运行情况很有意义。将地址总线上的信息引入逻辑分析仪，经 D/A 变换后进行图解显示，显示循环往复的地址量表示运行循环程序，显示不连续的地方表示程序跳转或偏离正常顺序的状态（即出错）。

(5) 映像显示方式

映像显示是指把逻辑分析仪存储器的全部内容以点图形式一次显示出来。与图解显示不同的是：该方式将每个存储器字分为高位和低位两部分，分别经由 X 和 Y 方向 D/A 变换器变换为模拟量，送入 CRT 的 X、Y 通道，所以每个存储器字点亮荧光屏上的一个点。如果映像显示的图形与正确的映像图不同，则表示被测系统存在故障。

图 8.15 所示为十进制 1 位 BCD 计数器映像图，该数据字的 4 位二进制代码分别以  $b_3$ 、 $b_2$ 、 $b_1$ 、 $b_0$  表示， $b_3$ 、 $b_2$  位经 D/A 变换后送入 Y 方向， $b_1$ 、 $b_0$  位经过 D/A 变换后送入 X 方向，CRT 上显示的第一行四个点的代码分别为 0000~0011，第二行四个点的代码分别为 0100~0111，第三行为 1000 和 1001，再由 1001 返回 0000 状态。

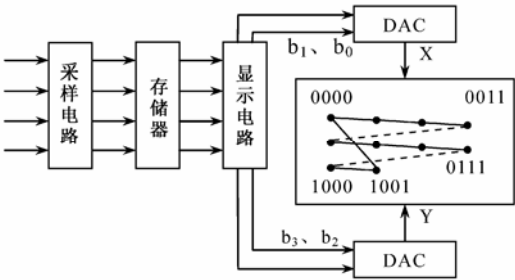


图 8.15 十进制 1 位 BCD 计数器映像显示

映像显示方式也可以观察程序运行情况。与图解显示方式相同，如果用分析仪观察微机的地址总线，则显示出的每个亮点是程序运行中一个地址的映像，图 8.16、表 8-4 为某程序存储与运行映像图的对照图表，图中三个“+”号表示地址单元的坐标位置。

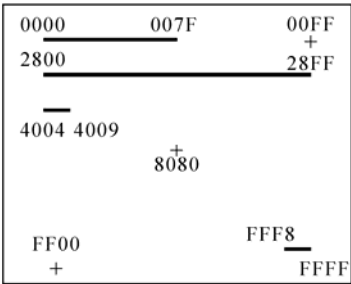


图 8.16 程序运行的映像图

表 8-4 程序存储与运行映像图对照表

0000~007F	堆栈
2800~28FF	主程序
4004~4009	输入/输出
FFF8~FFFF	向量

(6) 直方图显示方式

常见的直方图显示有时间直方图和标号直方图两种。时间直方图显示各程序执行时间的分布情况，用以确定各程序模块及整个程序的最小、最大和平均执行时间，据此可找出占用 CPU 时间过长及效率低、质量不高的程序模块。直方图显示方式的主要优点是能进行实时测试分析。图 8.17 表示某个由 M1240、CLEAR、DASH 和 DELAY 程序模块组成的软件运行情况。由图可见，执行 DELAY、DASH 程序几乎占用了 CPU 的全部时间。

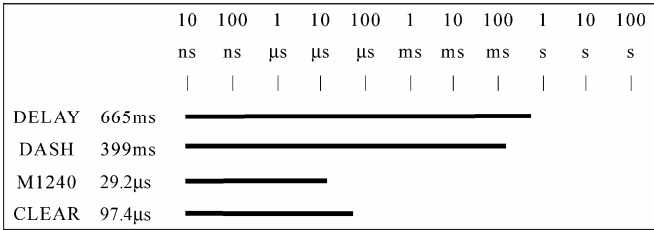


图 8.17 时间直方图

标号直方图又称为地址直方图。逻辑分析仪反复测量并累计在各个地址范围内事件出现的次数，最后以直方图形式显示测量结果。图 8.18 表示了上例程序的标号直方图，它与时间直方图的结果是一致的。

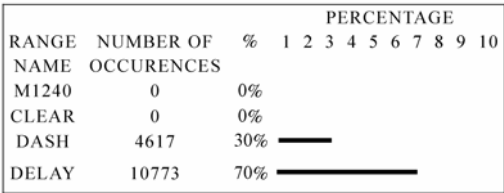


图 8.18 标号直方图

上述显示方式各具特点，应针对不同的测试对象，选择合适的显示方式。映像显示方式适合对系统工作进行“全景”检查，图解显示方式适合对可疑区进行仔细检查，波形显示方式可以对故障区进行仔细分析。

8.3.5 逻辑分析仪的主要性能指标与应用

1. 逻辑分析仪的主要性能指标

逻辑分析仪的性能指标主要包括定时分析最高速率、触发方式等以下几项。

(1) 定时分析最高速率

定时分析最高速率是指逻辑分析仪工作在定时分析方式时的最高数据采集速率。它可以是实际的采样时钟最高速率，也可以是等效采样速率。目前，逻辑分析仪主流产品的采样速率高达 500MHz/s，此时可以看到 0.1ps 时间上的细节。

(2) 状态分析最高速率

状态分析最高速率也就是逻辑分析仪可以分析的系統最快的工作频率。逻辑分析仪工作在状态分析方式时，被测试对象的工作时钟用作逻辑分析仪采样的基准时钟，该时钟的最高速率就是逻辑分析仪的最高状态分析速率。





### （3）通道数

通道数即逻辑分析仪信号输入通道数量，包括数据通道和时钟通道。通道越多，同时可观测的信号越多。

### （4）存储深度

存储深度即内存长度，是指每个通道可以存储的数据位数，单位为比特（bit）/通道，一般为几 kbit 至几十 kbit。

### （5）触发方式

逻辑分析仪的触发方式一般有通道触发、毛刺触发、字触发等多种方式，字触发方式又有组合触发、限定触发、序列触发等。

### （6）输入信号最小幅度

输入信号最小幅度即逻辑分析仪能检测到的输入信号的最小幅度。

### （7）毛刺捕捉能力

毛刺捕捉能力即逻辑分析仪所能检测到的最小毛刺脉冲的宽度。

除了以上主要性能指标外，还有存储方式、显示方式、采样方式等性能指标。应结合需要，选择指标合适的逻辑分析仪。

## 2. 逻辑分析仪的应用

逻辑分析仪的探头由若干个具有细小探针的探极集中而成，用于连接高密度的集成电路。

逻辑分析仪对被测系统进行数据采样的方式分为同步采样和异步采样。以被测系统时钟脉冲作为数据采样脉冲的方式称为同步采样；以逻辑分析仪自身产生的时钟脉冲作为数据采样脉冲的方式称为异步采样。由于逻辑分析仪内部时钟频率一般比被测系统的时钟频率高很多，故异步采样方式可以在单位时间内得到更多的信息量，从而提高测试分辨力，测试的数据将更精确。例如，同步采样无法检测两相邻时钟脉冲间的干扰波形，而异步采样却可以检测出波形中的毛刺干扰，并将毛刺干扰存储至存储器中。

数据存储过程中，为了便于存入所需的检测数据流，应注意选择合适的触发方式。逻辑分析仪也可以不采用触发方式工作，使被测系统数据不断存入存储器，待存储器存满之后，自动进入显示过程。

逻辑分析仪的工作过程就是数据采集、存储、触发及显示的过程。由于分析仪采用了数字存储技术，可将数据采集工作和显示工作分开进行或同时进行，若有必要还可以对存储数据反复进行显示。逻辑分析仪的应用实例如下。

### （1）测试数字集成电路

将数字集成电路芯片接入逻辑分析仪中，选择合适的显示方式可以得到具有一定规律的图像。如果显示不正常，可以根据显示的不正确图形，查找到逻辑故障的位置。图 8.19 所示为测量 RAM2114 的连接图。RAM2114 是容量为 1kB×4 的 RAM 存储芯片，它有 10 条地址线，4 条数据线，一个片选信号端  $\overline{\text{CS}}$ ，一个写允许信号端  $\overline{\text{WE}}$ 。当提供  $\overline{\text{CS}}$  端“0”信号时，对 RAM 进行写入功能的测试。当提供  $\overline{\text{WE}}$  端“1”信号时，对 RAM 进行读出功能的测试。由逻辑脉冲发生器提供 RAM 工作的各种逻辑脉冲，逻辑分析仪的探头与 RAM 的所有管脚连接以检测所有管脚上产生的信息。

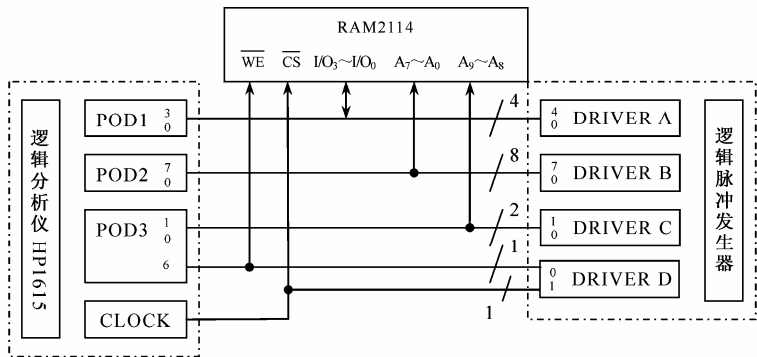


图 8.19 测量 RAM2114 的连接图

(2) 测试时序关系及干扰信号

逻辑定时分析仪可以用来检测数字系统中各信号间的时序关系、信号的延迟时间以及各种干扰脉冲等因素。例如，测定计算机通道电路之间的延迟时间时，可将计算机通道电路的输入信号、输出信号各自接到逻辑分析仪的一组输入端，然后利用脉冲间隔的变化，在荧光屏上显示输出与输入波形间的延迟时间。

磁带机或磁盘机等计算机外部设备在使用中常出现毛刺型干扰脉冲，用示波器难以捕捉到这种偶发的窄脉冲信号，但逻辑分析仪却可以使用毛刺触发方式迅速准确地捕捉并显示出来。

(3) 检测微处理器系统的运行情况

微处理器系统工作过程中经常发生软硬件故障，图 8.20 是用逻辑分析仪检测微处理器系统运行情况的连接示意图及其显示数据。图中 CP (Clock Pulse, 时钟脉冲) 提供逻辑分析仪与 CPU (Central Processing Unit, 中央处理器) 工作的时钟脉冲，微处理器系统的多路并行地址信号和数据信号分别接到逻辑分析仪的输入探头，用读/写控制线作为逻辑分析仪的触发信号。这样可以使运行中的微处理器系统的地址线和数据线上的内容通过逻辑分析仪显示出来。当发现故障时，可以采用不同的显示方式显示出故障前后的信息情况，为迅速排除故障、提高工作效率提供便利。

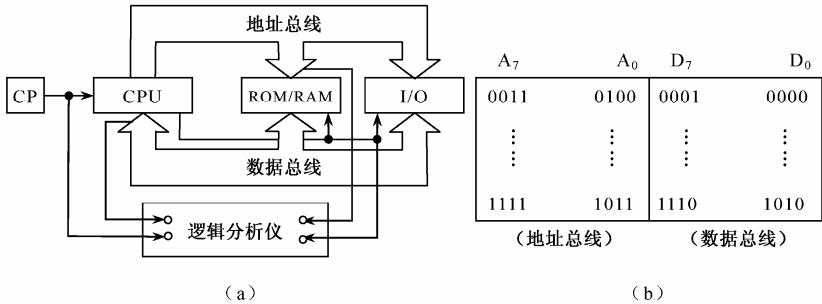


图 8.20 检测微处理器系统

除了故障检测外，还可监视微处理器的一些特定事件，例如：

1) 监视微处理器的加电功能

各种微处理器系统加电后，复位电路将特定的地址送到地址总线上，如 FFFE<sub>H</sub> 和 FFFF<sub>H</sub>，



将两个地址单元的内容送入程序计数器 PC (Program Counter)，总控程序从此开始。为了监视微处理器的加电功能，应设置地址总线上的信息 FFFE<sub>H</sub> 为触发字，由该触发字开始采集并显示地址信息，如果地址信息正确，说明微处理器加电功能正常。

## 2) 监视中断功能

中断事件在微处理器系统中是随机的偶发事件，微处理器唯一能知道的地址是中断矢量地址。在监视中断功能时，将某一中断源的中断矢量地址作为触发字，选用合适的触发方式以便存储和显示中断前后堆栈的内容及中断服务程序的执行情况。

## 3) 监视数据传送

微处理器可以通过异步通信接口与其他数字系统进行数据传送。为了监视数据传送功能，可将存储器缓冲区的首地址作为触发字，通过检测发出或接收的数据是否正确来监视异步通信功能的正确性。

## (4) 数字系统的自动测试系统

由微型计算机（带 GPIB 总线控制功能）、逻辑分析仪、逻辑发生器以及相应的软件可组成数字电路自动测试系统。使用不同的应用程序，该系统能够完成中小规模数字集成芯片的功能测试、某些大规模数字集成电路逻辑功能的测试、程序自动跟踪、在线仿真以及数字系统的自动分析功能。测试系统的硬件组成如图 8.21 所示。图中逻辑脉冲发生器是可编程的比特图形发生器，可用微处理机对它编程，提供测试所需的激励信号。这样的自动测试系统要求使用者了解微型计算机工作原理、GPIB 总线工作原理及其控、听、讲功能，并且能够针对不同的测试对象编制不同的应用程序。有条件的使用者，可选择一种数字系统作为一个自动测试系统。有关内容参见 9.1.2。

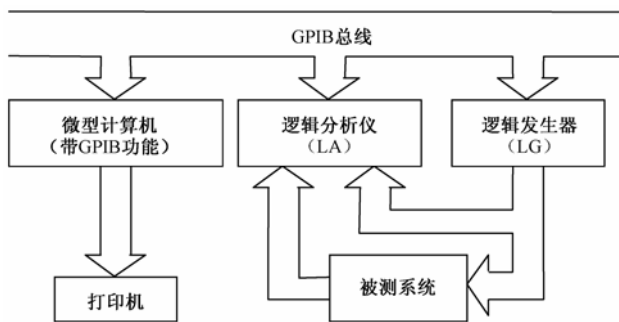


图 8.21 自动测试系统



## 本章小结

本章主要介绍数据域测量技术及逻辑笔、逻辑分析仪的组成原理及其应用。

(1) 数据域测量就是对数字系统数据流的测量。数据域测量内容包括数字系统的故障检测、故障定位、故障诊断以及数据流的检测和显示。

(2) 数据域测量方法包括穷举测试法、伪穷举测试法和随机测试法。

(3) 数据域测量仪器设备包括万用表、示波器、逻辑笔、逻辑夹、逻辑脉冲发生器及逻辑分析仪。逻辑笔和逻辑夹主要用于简单逻辑电路的测试。逻辑脉冲发生器用于产生数据域测量所需的各种信号。逻辑分析仪是数字系统软、硬件分析的主要仪器，可以对逻辑电路、逻辑状态进行记录和显示，实现对逻辑系统



的分析。

(4) 逻辑分析仪是以单通道或多通道实时获取与触发事件相关的逻辑信号，并显示触发事件前后所获取的信号，供软件及硬件分析的一种仪器。

(5) 逻辑分析仪包括逻辑状态分析仪和逻辑定时分析仪，逻辑状态分析仪侧重于软件分析，逻辑定时分析仪侧重于硬件分析。

(6) 逻辑分析仪的工作过程包括数据采集、存储、触发跟踪及显示过程。触发方式包括通道触发、字触发和毛刺触发等，字触发又分为组合触发、延迟触发、限定触发、序列触发等。显示方式包括波形显示、数据列表显示、反汇编显示、图解显示、映像显示、直方图显示等。应选择适当的触发方式和显示方式以完成对数字系统的测试。



## 习题 8

1. 什么是数据域测量？有什么特点？
2. 什么是穷举测试法、随机测试法、伪穷举测试法？各有什么特点？
3. 逻辑笔、逻辑夹、逻辑分析仪的用途是什么？与万用表、示波器在数据域测量中的区别是什么？
4. 逻辑分析仪包括哪几种？各有什么用途？
5. 逻辑分析仪的组成是怎样的？试简要叙述它的工作过程？
6. 逻辑分析仪的触发方式有哪几种？各有什么特点？
7. 逻辑分析仪的显示方式有哪几种？各有什么特点？
8. 逻辑分析仪怎样测试数字集成电路？
9. 逻辑分析仪怎样测试时序关系及毛刺干扰？

# 第 9 章 智能测试仪器与系统



**学习参考：**智能仪器是电子测量仪器与计算机技术的结合，发展十分迅速。通过本章学习要求明确智能仪器、自动测试系统、虚拟仪器、个人仪器的区别与联系，了解智能仪器的组成及各部分的原理与特点，了解智能仪器的典型处理功能。

**本章要点：**智能仪器的组成、智能仪器实例、个人仪器与自动化测试仪器的基本组成

## 9.1 智能仪器概述

凡是具有人工智能化的测量仪器均可称为智能仪器，如无特别说明，书中的智能仪器特指为独立智能仪器（即传统智能仪器）。独立智能仪器又称为灵巧仪器（Smart Instrument），它是自身带有微处理器，能够独立进行测试的电子仪器。除此之外，自动测试系统、个人仪器、虚拟仪器等也是具有人工智能化的测量仪器。本章主要介绍独立智能仪器。

### 9.1.1 智能仪器的组成

智能仪器由硬件和软件两部分组成。

#### 1. 硬件

硬件主要包括主机电路、模拟量输入/输出通道、人机接口和标准通信接口电路等，如图 9.1 所示。

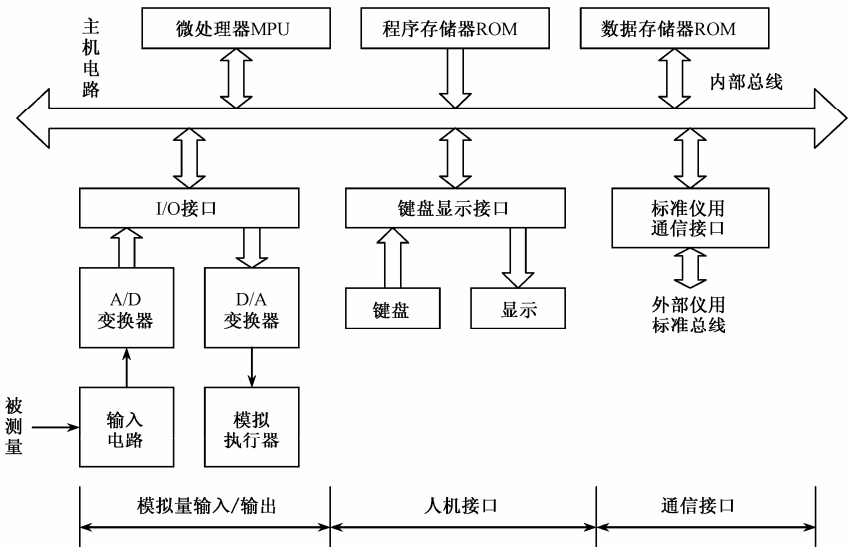


图 9.1 智能仪器硬件结构



(1) 主机电路用来存储程序与数据, 并进行一系列的运算和处理, 并参与各种功能控制。主机由微处理器、程序存储器、输入/输出 (I/O) 接口电路等组成, 或者本身就是一个单片微型计算机。

(2) 模拟量输入/输出通道用于输入/输出模拟信号, 实现模拟量与数字量之间的变换。主要由 A/D 变换器、D/A 变换器和有关的模拟信号处理电路等组成。

(3) 人机接口用于沟通操作者与仪器之间的联系, 主要由仪器面板上的键盘和显示器等组成。

(4) 标准通信接口用于实现仪器与计算机的联系, 使仪器可以接收计算机的程控命令, 一般情况下, 智能仪器都配有 GPIB (或 RS232) 等标准通信接口。

## 2. 软件

软件即程序, 主要包括监控程序和接口管理程序。

监控程序面向仪器面板和显示器, 负责完成如下工作: 通过键盘操作, 输入并存储所设置的功能、操作方式和工作参数; 通过控制 I/O 接口电路进行数据采集, 对仪器进行预定的设置; 对数据存储器所记录的数据和状态进行各种处理; 以数字、字符、图形等形式显示各种状态信息以及测量数据的处理结果。

接口管理程序主要面向通信接口, 负责接收并分析来自通信接口总线的各种有关功能、操作方式和工作参数的程控操作码, 并根据通信接口输出仪器的现行工作状态及测量数据的处理结果以响应计算机的远程控制命令。

### 9.1.2 GPIB接口

GPIB (General Purpose Interface Bus) 接口即国际公认的 IEEE-488 (IEEE, Institute of Electrical and Electronic Engineering, 电器与电子工程师协会) 接口, GPIB 称为通用接口总线, 是国际通用的仪器接口标准。一般情况下, 智能仪器都配有 GPIB 标准接口。

#### 1. GPIB标准接口的概述

GPIB 接口是一种数字总线系统, 在它支持下的每个主单元或控制器可以控制多至 10 台以上的仪器或装置, 使其相互之间能够通过总线以并行方式进行通信。总线 (Bus) 是由特殊设计的联接器和通信电缆组成的, 用于实现与总线相连的各设备之间的信息交换与通信。

GPIB 标准接口包括接口与总线两部分。接口部分由各种逻辑电路组成, 与各仪器装置安装在一起, 用于对传送的信息进行发送、接收、编码和译码。总线部分是一条无源多芯电缆, 用于传输各种消息。消息指的是总线上传递的各种信息。图 9.2 (a) 所示为具有 GPIB 接口的仪器通过 GPIB 总线连接起来的标准接口总线系统, DUT (Device Under Test) 为被测器件。图 9.2 (b) 为 GPIB 24 线总线连接器外形结构。

在一个 GPIB 标准接口总线系统中, 要进行有效的通信联络, 至少要有“讲者”、“听者”、“控者”三类装置。“讲者”是通过总线发送消息的装置, 如测量仪器、数据采集器、计算机等。“听者”是通过总线接收由讲者发出消息的装置, 如打印机等。“控者”是数据传输过程中的组织者和控制者, 通常由计算机担任。一个 GPIB 系统中, 可以设置多个“讲者”、“听者”和“控者”, 不允许有两个或两个以上的“讲者”或“控者”同时起作用, 但允许多个听者同时工作。“控者”、“听者”、“讲者”被称为系统功能的三要素, 系统中的某一个装置可以具有三要素中的一个、两个或全部功能, 例如, 系统中的计算机可以兼有“讲者”、“听者”



与“控者”的功能。

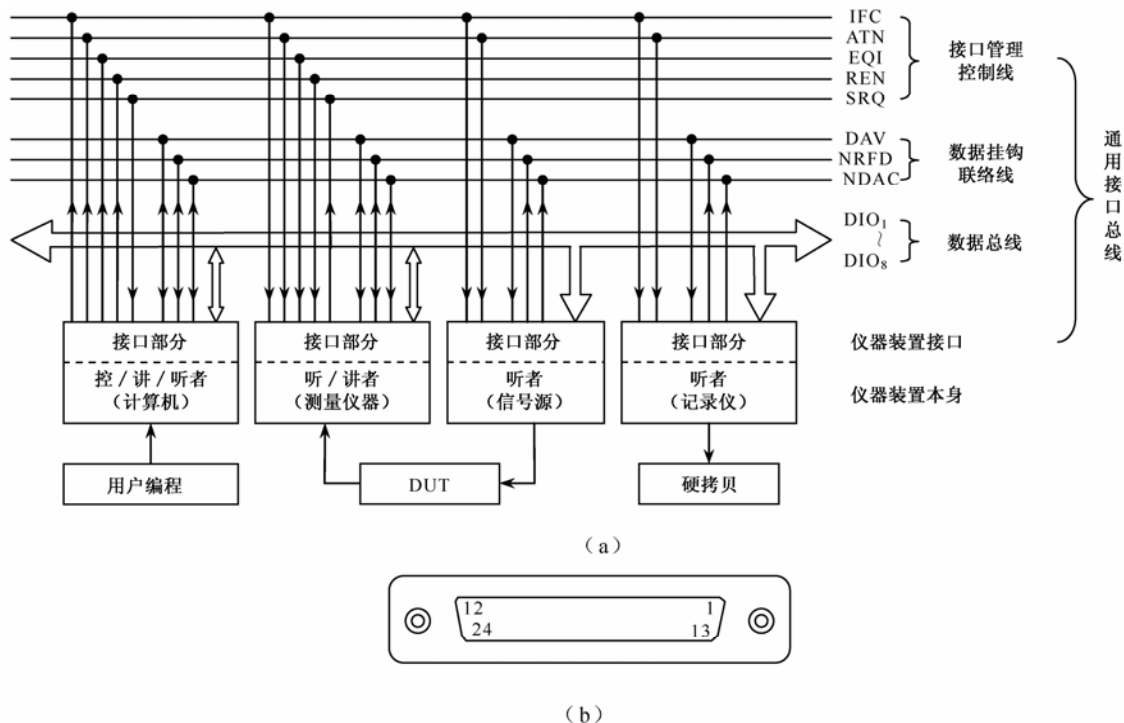


图 9.2 GPIB 标准接口总线系统及 GPIB 24 线总线连接器

## 2. GPIB标准接口的总线结构

GPIB 接口总线是一条 24 芯电缆，其中 16 条被用作信号线，其余则被用作逻辑地线及屏蔽线。电缆两端是与图 9.2 (b) 相似的双列 24 芯叠式结构插头。

GPIB 标准接口总线中的 16 条信号线按功能可分为以下三组：

① 8 条双向数据总线 (DIO<sub>1</sub>~DIO<sub>8</sub>)，用于传递包括数据、命令和地址等的仪器或接口消息，所传递消息的类型由其余两组信号线加以区分。

② 3 条数据挂钩联络线 (DAV、NRFD 和 NDAC)，用于控制数据总线的时序，以保证数据总线能正确、有节奏地传输信息，这种传输技术称为三线挂钩技术。三线挂钩指的是“讲者”、“控者”、“听者”之间的逻辑联接与接续关系。定义如下：

- DAV (Data Valid) 数据有效线，当数据线上出现有效数据时，“讲者”置 DAV 线为低（负逻辑①），示意“听者”从数据线上接收数据。
- NRFD (Not Ready For Data) 数据未就绪线，只要“听者”中有一个尚未准备好接收数据，该线就为低，示意“讲者”暂不要发出信息。
- NDAC (Not Data Accepted) 数据未收到线，只要“听者”中有一个尚未从数据总线上接收完数据，NDAC 线就为低，示意“讲者”暂不要撤掉数据总线上的信息。

③ 5 条接口管理控制线 (ATN、IFC、REN、EOI 和 SRQ)，用于控制 GPIB 总线接口的状态。定义如下：

- ATN (Attention) 注意线，该线由“控者”使用，用来指明数据线上数据的类型。当 ATN 线为 1 时，数据总线上的信息是由“控者”发出的、用于管理接口部分工作的



消息（命令、设备地址等），这时，一切设备均要接收这些信息。当它为 0 时，数据总线上的信息是由“讲者”发出的、用于完成仪器自身工作的仪器消息（数据、设备的控制命令等），所有“听者”都必接收这些信息。

- IFC（Interface Clear）接口清除线，该线由“控者”使用，当 IFC 线为 1 时，整个接口系统恢复到初始状态。
- REN（Remote Enable）远程控制线，该线由“控者”使用，当它为 1 时，仪器可能处于远程控制状态，从而封锁设备面板上的手工操作。当它为 0 时，仪器处于本地工作方式。
- SRQ（Service Request）服务请求线，所有设备都与该线“线或”在一起，任意设备将 SRQ 线变为 1 时，表示向“控者”提出服务请求，然后“控者”通过依次查询确定提出请求的设备。
- EQI（End Or Identify）结束或识别线，此线与 ATN 配合使用，当 EOI 线为 1 和 ATN 线为 0 时，表示“讲者”已传递完一组数据；当 EOI 线为 1、ATN 线为 1 时，表示“控者”要进行识别操作，要求设备把它们的状态放在数据线上。

### 3. GPIB 标准接口的功能

智能化测量仪器中每一个仪器装置都具有仪器功能和接口功能。仪器功能的任务是把收到的控制信息变成仪器设备的实际动作，如调节频率、调节信号电平、改变仪器工作方式等，这与常规仪器设备的功能基本相同。为完成仪器功能而传递的消息称为仪器消息。接口功能是指完成各仪器设备之间正确通信，确保系统正常工作的能力，即通过 GPIB 标准接口实现自动测量与控制所必须的逻辑功能。为完成接口功能而传递的消息称为接口消息。

接口功能包括：遇到故障等情况时，向系统“控者”提出服务请求的服务请求功能；系统“控者”为快速查询请求服务装置而设置的并行点名功能；用来选择远地工作状态或本地工作状态的远控、本控能力；使装置从总线接收到触发信息，以便进行触发操作的装置触发功能；能实现使仪器装置接收清除信息并返回到初始状态的装置清除功能等。

#### 9.1.3 智能仪器的特点

与传统测量仪器相比较，智能仪器具有以下特点：

##### 1) 具有较完善的可编程能力

智能仪器内部有微处理器，一般配有 GPIB 或 RS232 等接口，并且采用 ASCII 码进行信息传递，使智能仪器具有可编程操作的能力。

##### 2) 面板控制（本地控制）简单灵活

智能仪器使用键盘代替传统仪器中旋转式或琴键式切换开关来实现对仪器的控制，这样既有利于提高仪器性能指标，又方便仪器的操作。

##### 3) 输入输出方式灵活多样

智能仪器可通过键盘输入任何数据或文字信息，或者用磁带、软盘等输入程序。能以数字、字符、图形显示等方式输出。输入输出方式灵活多样。

##### 4) 电路结构简单，测量精确度高，测量功能多样化

微处理器具有强大的数据运算、数据处理和逻辑判断功能，这使智能仪器能够有效地消除由于漂移、增益变化和干扰等因素所引起的误差，从而提高仪器的测量精度，电路结构进





一步简化，测量功能更加多样化。

### 5) 自动控制、自动调整能力增强

智能仪器运用微处理器进行控制，可以方便地协调控制仪器的工作，实现测量仪器的自动控制，并具有一定的可编程能力及自动调零、自检、自校等功能，操作简单、维修方便。

## 9.2 智能仪器的典型处理功能

智能仪器是以微处理器为核心进行工作的，它具有强大的数据处理和控制功能，与传统测量仪器相比具有许多典型的处理功能，例如自检、自动测量等功能。

### 9.2.1 硬件故障的自检功能

自检功能是指利用事先编制好的检测程序对仪器主要部件进行检测，并对故障进行定位。自检方式有三种类型。

#### (1) 开机自检

开机自检是在仪器正式投入运行之前，即仪器接通电源或复位之后所进行的全面检查。自检中如果没有发现问题，就进入测量程序；如果发现问题，则及时报警，以避免仪器在有故障情况下工作。

#### (2) 周期性自检

周期性自检是指在仪器运行过程中间断进行的自检操作，这种操作可以保证仪器在使用过程中一直处于正常状态。周期性自检不影响仪器的正常工作，因而只有当出现故障报警时，用户才会觉察。

#### (3) 键盘自检

具有键盘自检功能的仪器面板上设有“自检”按键，当用户对仪器的可信度产生怀疑时，便通过该按键来启动一次自检过程。自检过程中，如果检测到仪器出现某些故障，智能仪器一般都以文字或数字的形式显示“出错代码”。另外，往往还以指示灯的闪烁或声音等方式进行报警，以引起操作人员的注意。

### 9.2.2 自动测量功能

智能仪器通常具有自动量程变换、自动零点调整、自动校准以及自动触发电平调节等自动测量功能。

#### (1) 自动量程变换

自动量程变换是指仪器在很短时间内自动选定最合理的量程。这样可以使仪器获得高精度的测量，并简化操作。自动量程变换一般由初设量程开始，逐级比较，直至选出最合适的量程为止。假设某电压表共有 0.1V、1V、10V、100V 四个量程，它的自动量程变换流程如图 9.3 所示。

#### (2) 自动触发电平调节

智能仪器自动触发电平调节原理如图 9.4 所示，其中，输入信号经过可编程衰减器传送到比较器，比较器的比较电平（即触发电平）则由 D/A 变换器设定。当经过衰减器的输入信号的幅度达到某一比较电平时，比较器输出将改变状态。触发探测器将检测到的比较器输出状态送到微处理器，由此测出触发电平。

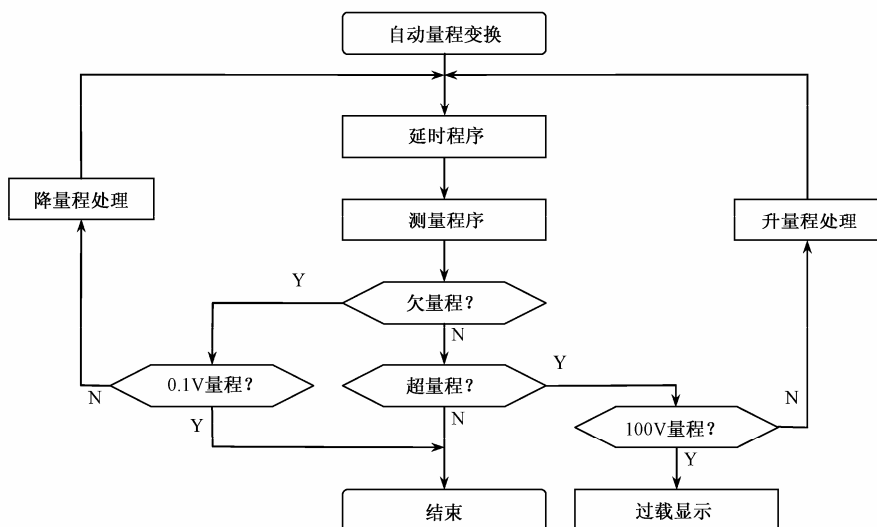


图 9.3 电压表自动量程变换流程图

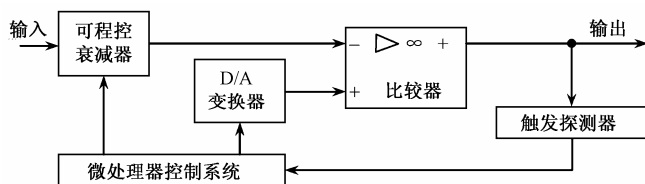


图 9.4 自动触发电平调节原理图

### (3) 自动零点调整

仪器零点漂移的大小及零点是否稳定是产生测量误差的主要来源之一，智能仪器能够在微处理器的控制下，自动产生一个与零点偏移量相等的校正量与零点偏移量抵消，从而有效地消除零点偏移等对测量结果的影响，这就是智能仪器自动清零功能。

### (4) 自动校准

智能仪器自动校准时，操作者按下“自动校准”按键，仪器显示屏便提示操作者应输入的标准电压，操作者按提示要求将相应标准电压加到输入端后，再按一次“自动校准”键，仪器进行一次测量并将标准量存入到校准存储器，然后显示器提示下一个要求输入的标准电压值，再重复上述测量存储过程。当对预定的校正测量完成后，校准程序还能自动计算每两个校准点之间的修正公式系数，并把系数存入校准存储器，于是在仪器内部固存了一张校准表和一张修正公式系数表。在正式测量时，它们将与测量结果一起形成经过修正的准确测量值，该方法称为校准存储器法。为防止丢失数据，存储器采用 EEPROM（Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory，电擦除只读存储器）或采用锂电池供电的非易失性存储器 RAM（Random Access Memory，随机存储器）。

除上述功能外，智能仪器还利用微处理器对测量过程中产生的随机误差、系统误差、粗大误差自动进行处理，以减小测量误差对测量结果的影响。另外，在不增加任何硬件设备的情况下，还利用微处理器采用数字滤波方法消除或削弱测量中的干扰和噪声的影响，提高测量的可靠性和精确度。



## 9.3 智能仪器实例——智能化DVM简介

### 9.3.1 概述

#### 1. 组成

智能 DVM 是以微处理器为核心的数字电压表，典型结构如图 9.5 所示。包括微处理器芯片、程序存储器 ROM（Read Only Memory，只读存储器）和数据存储器 RAM、输入电路、A/D 变换器、键盘、显示器及标准仪用接口电路等。仪器内部采用总线结构，外部设备与总线相连。

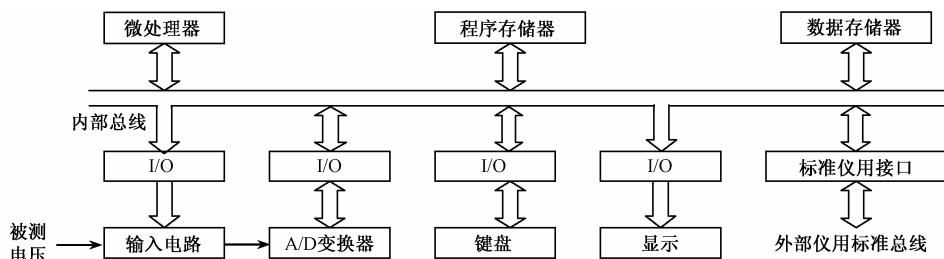


图 9.5 智能 DVM 的典型结构

#### (1) 输入电路

输入电路的主要作用是提高输入阻抗、实现量程变换。图 9.6 所示为 DATRON 1071 型智能 DVM 输入电路，它主要由输入衰减器、输入放大器、有源滤波器、输入电流补偿电路及自举电源等部分组成。

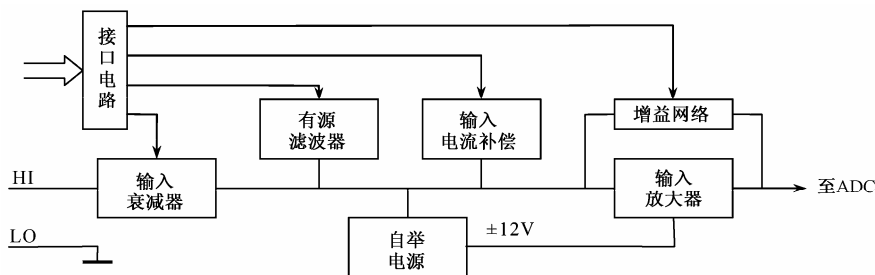


图 9.6 DATRON 1071 型智能 DVM 输入电路

有源滤波器是否接入由微处理器通过 I/O 接口电路进行控制，该滤波器对 50Hz 的干扰信号将产生 54dB 的衰减。

输入电流补偿电路的作用是减小输入电流的影响，补偿原理如图 9.7 所示。自动补偿时，在输入端接入一个  $10\text{M}\Omega$  的电阻，输入电流  $+I_b$  在该电阻上产生的压降经 A/D 变换后存入非易失性存储器 RAM 内，作为输入电流的校正量，如图 9.7 (a) 所示。在正常测量时，微处理器根据校正量送出适当的数字到 D/A 变换器并经输入电流补偿电路产生一个与原来输入电流  $+I_b$  大小相等方向相反的  $-I_b$ ，使两者在放大器的输入端相互抵消，如图 9.7 (b) 所示。

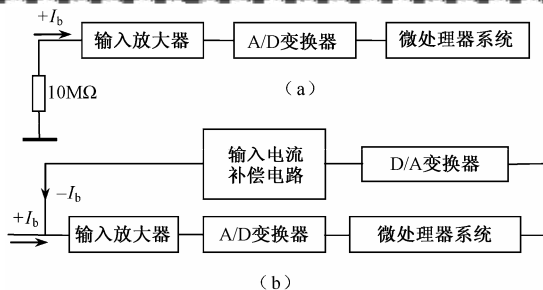


图 9.7 输入电流补偿电路原理图

自举电源产生浮动的 $\pm 12\text{V}$ 电压作为输入放大器的电源电压,使得输入放大器工作点基本不随输入信号的变化而变化,提高放大器的稳定性与抗共模干扰能力。

输入衰减器和输入放大器构成智能 DVM 的量程标定电路,如图 9.8 所示。 $S_1$  为继电器开关, $S_{1.1}$ 和 $S_{1.2}$ 是继电器开关 $S_1$ 的两个触头 $S_1$ 控制 100:1 衰减器是否接入。 $S_2 \sim S_7$  为模拟开关,通断状态不同,输入放大器的电压增益不同。 $S_1 \sim S_7$  在微机发出的控制信号的控制下,形成不同的通、断组态,构成 0.1V、1V、10V、100V、1000V 五个量程及自测试状态,五个量程的电压输出范围均为 0~3.16V,自测试状态时输出电压为-3.12V,输入放大器的输出电压被送入 A/D 转换器。 $S_1 \sim S_7$  与量程的关系如下:

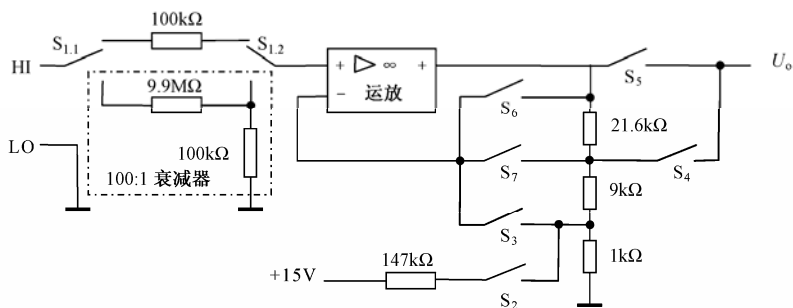


图 9.8 量程标定电路原理

① 0.1V 量程 当 $S_3$ 和 $S_5$ 闭合时,放大电路接成电压负反馈放大器,其放大倍数 $A_f$ 及最大输出电压 $U_{\text{omax}}$ 分别为

$$A_f = (21.6 + 9 + 1) / 1 = 31.6$$

$$U_{\text{omax}} = 0.1\text{V} \times 31.6 = 3.16\text{V}$$

② 1V 量程 当 $S_5$ 和 $S_7$ 闭合时,放大电路被接成串联负反馈放大器,其放大倍数 $A_f$ 及最大输出电压 $U_{\text{omax}}$ 分别为

$$A_f = (21.6 + 9 + 1) / (9 + 1) = 3.16$$

$$U_{\text{omax}} = 1\text{V} \times 3.16 = 3.16\text{V}$$

③ 10V 量程 当 $S_4$ 和 $S_6$ 闭合时,放大电路被接成跟随器,放大倍数为 1,然后输出又经分压,此时

$$U_{\text{omax}} = 10\text{V} \times (9 + 1) / (21.6 + 9 + 1) = 3.16\text{V}$$

④ 100V 量程 当 $S_5$ 和 $S_7$ 闭合时,放大电路仍为串联负反馈放大器。同时继电器开关 $S_1$ 向下吸合,使 100:1 衰减器接入,此时



$$U_{\text{omax}}=100\text{V}\times 1/100\times (21.6+9+1)/(9+1)=3.16\text{V}$$

⑤ 1000V 量程  $S_1$  吸合, 使 100:1 衰减器接入, 同时  $S_4$  和  $S_6$  闭合时, 放大电路被接成跟随器, 并使输出再经分压后输出, 此时

$$U_{\text{omax}}=1000\text{V}\times 1/100\times (21.6+9+1)/(9+1)=3.16\text{V}$$

⑥ 当  $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_5$  闭合,  $S_1$  吸合时, 电路处于自测试状态, 电路输出电压为  $-3.12\text{V}$ 。仪器在自诊断时测量该电压, 并与存储的数值比较, 若两者之差在 6% 内, 即认为放大器工作正常。

## (2) A/D 变换器

智能仪器 A/D 变换器是在一般 A/D 变换器的基础上, 借助软件来形成的高精度 A/D 变换器, 如脉冲调宽式、三次积分式 A/D 变换器等。

## (3) 键盘、显示器、打印机

键盘、显示器、打印机是人机对话的设备。键盘实现对智能仪器进行人工状态干预和数据输入。显示器和打印机是实现智能仪器运行状态与处理结果进行显示的设备。

智能 DVM 的测量过程是: 首先在微处理器的控制下, 被测电压经过输入电路、A/D 变换器的处变换为相应的数字量, 存入到数据存储器中。然后微处理器对采集的测量数据进行必要的处理, 例如计算平均值、减去零点漂移等。最后利用显示器等显示处理结果。上述整个工作过程都是在监控程序的控制下进行的。

# 2. 智能化DVM的主要性能指标

智能 DVM 除了具有普通 DVM 的各项性能指标外, 还有如下几项性能指标。

## (1) 标定

$$R_D=A x+B$$

式中,  $R_D$  为最后显示结果,  $x$  为实际测量值,  $A$ 、 $B$  是由键盘输入的常数。

利用这一性能, 可将实际测量值  $x$  换算成显示结果  $R_D$ , 例如将传感器输出的测量值直接用实际单位进行显示实现标度变换。

## (2) 相对误差

$$\gamma=\frac{x-n}{n}\times 100\%$$

式中,  $\gamma$  为相对误差,  $n$  是由键盘输入的标称值。

利用这一性能, 可将测量结果与标称值的差值以百分率偏差的形式显示出来, 适用于元件容许误差的校验。

## (3) 极限 (LMT)

即上下限报警功能。利用这一性能可以了解被测量超过预置极限的情况。使用前, 应先通过面板键盘输入上限值  $H$  和下限值  $L$ 。测量时, 在显示测量值  $x$  的同时, 还将显示标志  $H$ 、 $L$  或  $P$  (pass), 三者分别表示测量结果超上限、超下限或通过。

## (4) 最大/最小

利用最大/最小性能可以对一组测量值进行比较, 求出其中的最大值和最小值并存储起来, 在程序运行过程中一般只显示现行值, 在设定的一组测量进行完毕之后, 再显示这组数据中的最大值和最小值。



### (5) 比例

比例是指一个量与另一个量之间的相互关系，有以下三种形式：

$$R=x/r \quad (9-1)$$

$$R=20\lg(x/r) \quad (9-2)$$

$$R=x^2/r \quad (9-3)$$

式中， $r$  为由面板输入的参考量。

式 (9-1) 为简单比例；式 (9-2) 为对数比，单位为 dB；式 (9-3) 可以用瓦或毫瓦作为单位直接显示负载电阻  $r$  上的功率。

### (6) 统计

利用此项功能，可以直接显示多次测量值的统计运算结果，一般有平均值、方差值、标准差值、均方值等。

智能 DVM 一般还具有自动量程变换、自动零点调整、自动校准、自动诊断等功能，并配有标准接口。

## 9.3.2 典型智能 DVM 介绍

本节主要以国产 HG-1850 型智能 DVM 为例介绍智能 DVM 的组成原理及特点。

### 1. 组成原理

HG-1850 型智能 DVM 采用 Intel8080A CPU，多斜积分式 A/D 变换器，量程可以自动变换，最大显示数为 112200，可用于测量  $10\mu\text{V}\sim 1000\text{V}$  的直流电压。

图 9.9 所示为 HG-1850 型智能 DVM 原理框图，主要由模拟部分、数字部分组成。输入放大器和 A/D 变换器是保证仪器精度等技术指标的关键部分，为了避免干扰，仪器的模拟部分和数字部分在电气上采取相互隔离的措施，两部分单独供电，其间的信息经光电耦合器进行传递。

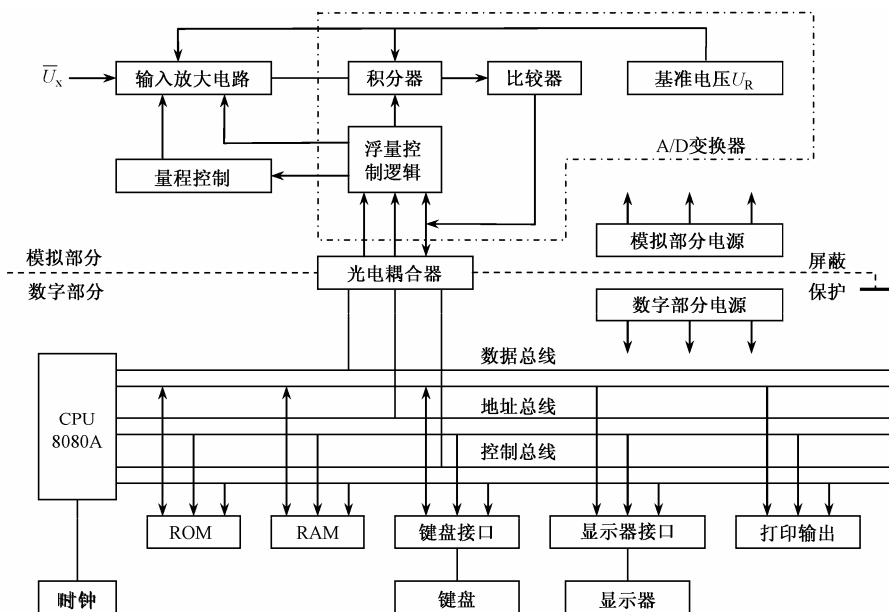


图 9.9 HG-1850 型智能 DVM 原理框图



## 2. 工作模式

HG-1850 型智能 DVM 具有五种工作模式，即测量模式、自检模式、用户程序模式、编程模式和自校准模式。

### （1）测量模式

测量模式是最基本的工作方式，在测量模式下用户可通过键盘选择适当的测量方式和量程，微处理器根据键盘选定的量程送出相应的开关量（控制字），使输入放大器组成相应的组态。测量时，被测电压首先经过输入放大器进入 A/D 变换器，然后 A/D 变换器把放大器输出的电压变成数字量存入到相应的内存单元。接着，微处理器将根据不同量程的校准参数并按相应的数学模型计算出正确的测量结果。若进行数据处理，还要调用有关的数据处理程序，否则直接显示测量结果。一次测量结束后，程序自动返回进行下一次测量，如此不断地循环测量。

### （2）自检模式

按下“自检”键时，仪器进入自检工作模式。在自检模式下，微处理器将按预定程序检查模拟单元各部分的工作状态。如果一切正常，显示器显示“pass”字样，然后返回到测量模式。若某一部分有故障，显示器将显示此故障的代码，然后等待 10s，再次检查模拟单元是否正常，直至故障被排除为止。

### （3）编程模式

按下“编程”键时，仪器进入编程模式。在编程模式下，用户可以利用仪器面板的键盘编制所需要的计算程序。编程结束后，程序又返回到测量模式下继续进行测量。

### （4）用户程序模式

按下“用户”键时，仪器进入用户程序模式。用户程序是按使用者需要而事先编制并固化在 ROM 中的测量、控制或数据处理程序。如果要结束用户程序模式而进入测量模式，需要按下“返回”键。

### （5）自校准模式

自校准模式是由程序控制自动进入的。仪器内部设立了一个 9bit 二进制自校计数器 M。每一次测量之后 M 的内容加 1，当计数器计满 512 次（约 3min）后，调用一次自校准程序，如此循环往复。

## 3. 整机工作流程

HG-1850 型智能 DVM 整机工作流程图如图 9.10 所示。仪器通电后程序首先进行初始设置：设置仪器为测量模式、自动量程状态、显示位为  $5\frac{1}{2}$ 、9bit 自校计数器 M 初值为全 1（即十进制数 511 或 1FFH）。初始设置完成后，程序使 M 值增加 1，直至 M 值产生溢出并成为全零，程序在 M 值为零后转入自校准程序，使仪器按顺序测得各个量程的校准参数并存入相应存储单元，为修正每次测量结果做好准备。全部校准参数测完后程序返回①点，M 值再次增加 1，其内容不再为零，接着程序转入扫描键盘。然后再根据键盘的输入信息来确定程序分支。

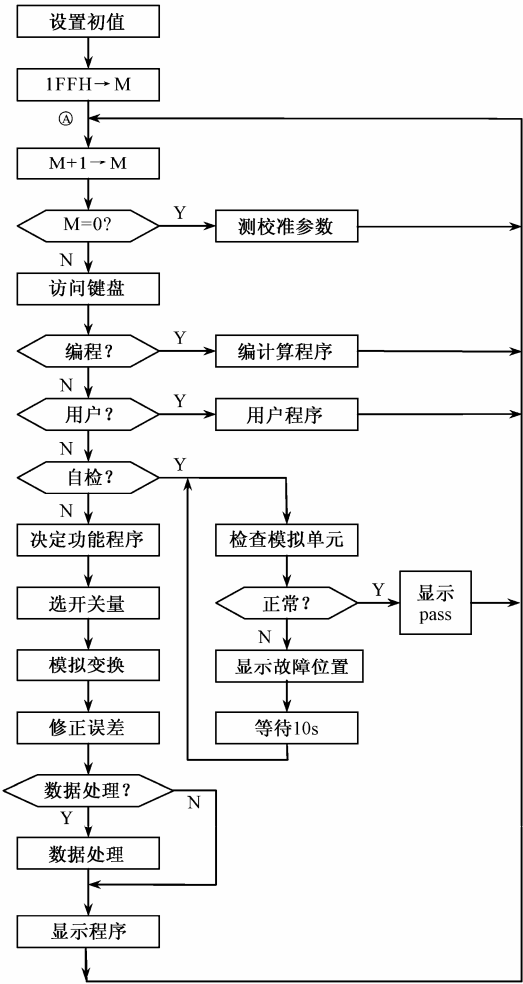


图 9.10 HG-1850 型智能 DVM 整机工作流程图

4. 键盘与面板说明

图 9.11 是 HG-1850 型智能 DVM 面板的键盘图，图中“⊖”为按键。键盘分为上下两排，每排有 12 只按键，每个按键上方都设有一只 LED 按键灯作为该按键是否有效的指示灯。

检查	清除	R	F	SF	+	×	÷	√	log	统计	编程
⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖
自检	计算						返回		用户		

+/-	•	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖
手动	连续	0.1	1	10	100	1000		自动	遥测	4½	5½

图 9.11 HG-1850 型智能 DVM 面板键盘图





### (1) 测量模式

当仪器在测量模式下时, 每个按键下方的标识表示该键的意义, 现说明如下:

① “手动”、“连续”两键为互锁键。当“连续”键被按下时, 测量自动连续进行, 即每测量一次显示读数自动更新一次, 当“手动”键被按下时, 显示器的内容将随每次按动“手动”键而更新, 若不按动该键, 显示器内容不予更新。

② 量程选择键“1”(1V 量程)、“10”(10V 量程)、“100”(100V 量程)、“1000”(1000V 量程)以及“自动”(自动量程变换)五键为互锁键。用于选择测量量程。

③ “遥测”键为自锁键。该键按下时, 指示灯点亮, 前面板上的其他键均失去作用, 这时从后面板接入键盘将能实现遥测。若再按一次“遥测”键, 该键释放, 指示灯熄灭, 前面板键盘各键重新生效。

④ 显示位数键“ $4\frac{1}{2}$ ”和“ $5\frac{1}{2}$ ”为互锁键。当分别按下这两键时, 显示位数分别为  $4\frac{1}{2}$  位、 $5\frac{1}{2}$  位, 按下前者时的测量速度快。

⑤ “自检”键按下后, 仪器将暂时脱离测量模式而进行自检。

⑥ “计算”键为自锁键。当用户编制了计算程序后, 按下此键就能按照所编程序对测量结果进行处理并显示处理结果, 此时该键指示灯点亮。如果再按一次该键, 则指示灯熄灭, 显示器仅显示测得的电压值。

⑦ “用户”键也为自锁键。如果按下该键, 仪器进入用户程序。用户程序已固化在仪器内部。

### (2) 编程模式

当按下“编程”键时, 仪器进入编程模式, 此时, 各键的功能用其上方的标识表示。各键意义如下:

① “检查”键用于检查或修改程序。连续按动该键时, 显示器将依次显示所编程序每一步的内容。

② “清除”键用于清除刚从键盘送入的数据。

③ “R”键用于直接显示仪器测量结果。

④ “F”键用于仪器显示在 RAM 区开辟的中间寄存器的内容。

⑤ “SF”键代表向寄存器 F 存数。

⑥ “+”、“×”、“÷”、“ $\sqrt{\quad}$ ”、“log”五键分别表示加法、乘法、除法、开方和常用对数运算。

⑦ “0”、“1”、……、“9”、“+/-”、“.”等键用于供编程时设置各种数据、正负号和小数点。

编程键除了在进入编程模式时需要按动该键外, 在每次编程之后也需要按动该键。此时, 显示器显示“HI”, 询问用户对测量结果有无上限要求。如果有上限要求可通过键盘送入上限值。这时再按“编程”键, 显示器显示“LO”, 用户可送入下限值。如无上下限要求只要不送数据即可。上下限值设置完毕之后再按一次“编程”键, 显示器显示“END”, 表示编程全部结束, 随即返回测量模式。下面举例介绍编程方法。

**【例 9-1】** 设某热电偶的待测温度  $T$  与传感器输入电压  $U$  之间存在的关系为  $T=4.4+7.6U+3.8U^2+0.2U^3$ , 试通过键盘编程实现用 HG-1850 型 DVM 对温度的测量处理, 实现对温度的直接读数。

解：为了方便编程，将上式变换为  $T=0.2\{[(U+19)U+38]U+22\}$ ，然后通过键盘编制计算程序，编程键的操作顺序如表 9-1 所示。

表 9-1 例 9-1 编程时按键的操作顺序

顺序	编程	显示器的响应	顺序	编程	显示器的响应
1	编程	PRO	12	R	RES
2	R	RES	13	+	Add
3	+	Add	14	2	2
4	1	1	15	2	22
5	9	19	16	×	HUL
6	×	HUL	17	•	0.
7	R	RES	18	2	0.2
8	+	Add	19	统计	St0
9	3	3	20	编程	HI
10	8	38	21	编程	LO
11	×	HUL	22	编程	END

5. 智能DVM的操作使用

智能数字电压表种类繁多，操作方法也不尽相同。但不管哪种型号的仪表，除了正确选用仪表外，均应熟悉其面板结构，按照仪表说明书正确操作使用，否则有可能造成操作错误甚至损坏仪表。在此重点介绍智能 DVM 的调整方式和使用。

(1) 智能 DVM 的调整方式

1) 全自动调整

仪表的调零及校准都由仪表内部自动进行，外部没有调整机构。

2) 只需调零，校准用外校

使用仪表时，首先要在所用的量程上调零。校准时，一般要在仪表的基本量程上外加标准电池或电压源。

3) 先调正、负平衡，再校准

先将仪表校准开关置于“正、负平衡”位置，调节平衡电位器，使 DVM 正、负显示值相等或在允许范围内。然后将校准开关拨到校准位置。这时，正、负显示值也应保持平衡，如果不相等，要反复调节并使之达到规定的要求。

4) 先调零平衡，再自校准

先将仪表校准开关放在零平衡位置，调节零平衡电位器，使显示值在±0 之间变化，再把开关拨至校准位置。调节“校准”电位器，使之显示规定的校准电压。此时，相反极性也应显示这一电压，否则需反复调节。

5) 调零、正负校准分别进行

将仪表选择开关先后置于“零调整”、“正校准”、“负校准”位置，调节相应的电位器，使之显示相应的零电压、正校准电压、负校准电压。有的表没有调零挡，其调零是在测量时短路输入端进行的。



## 6) 开盖调整

如果以上各种外部调整程序都进行完毕后仍达不到理想的显示效果时，则需打开机盖，调节内部的“调零”、“校准”、“量程满度”等电位器，使仪表符合性能指标要求。

## 7) 调节零电流

为了减小零电流的影响，有的 DVM 有零电流调节器。这种 DVM 在测量前也应按规定调节零电流的大小，使显示接近规定值为止。

## (2) 智能 DVM 的使用

国产 PZ115A 型数字电压表的前、后面板结构如图 9.12 (a)、图 9.12 (b) 所示。

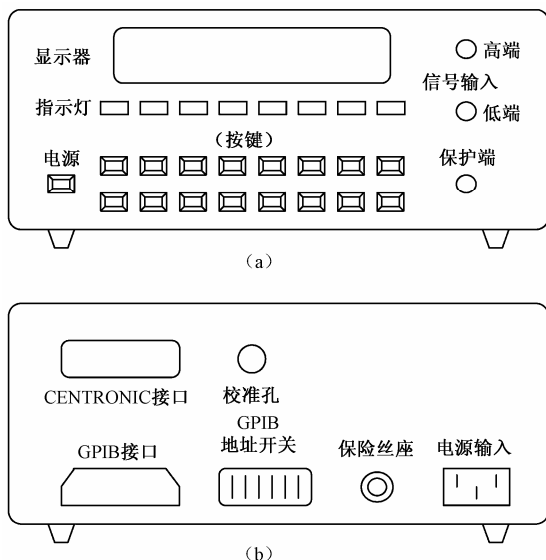


图 9.12 PZ115A 型数字电压表面板结构图

## 1) 开机状态

PZ115A 型数字电压表接通电源并经初始化后，自动处于  $4\frac{1}{2}$ 、中速、自动量程、自动校零、本地（即前面板）控制状态，“自动量程”灯和“自动校零”灯亮。

## 2) 测量信号输入端子

前面板有三个输入端子，“信号高端”通过继电器接到测量电路高端；“信号低端”接测量电路信号低端；“保护端”接仪表保护屏蔽层。一般测量场合，保护端子可以不用，如有明显共模干扰电压时，此端子接共模电压的高端，可以提高共模干扰抑制效果。

## 3) 键盘功能选择

仪器前面板共有 16 个按键，绝大多数的按键都有两挡功能，按键的左边文字或符号表示该键的第一挡功能，上边文字或符号表示该键的第二挡功能。选择某键第二挡功能时，必须先按红色“换挡”键，再按该键。

## 4) 自动校零和手动校零

PZ115A 型数字电压表有自动校零功能，在自动校零时“自动校零”灯亮，此时每隔 5min 自动校零一次。退出自动校零时“自动校零”灯熄灭。当需要人为校零时，可以连续按两次“自动校零”键，该 DVM 便执行两次校零操作，且保持原来的校零模式。校零操作可随时进行，不影响测量。



### 5) 连续取样和单次取样

PZ115A 型数字电压表具有连续取样和单次取样功能。按“单次”键，DVM 进入单次取样状态，“单次”指示灯亮，此时显示的是按“单次”键后测得的数值并保持不变，每按一次“单次”键就显示一个新的测量值。按“换挡”键再按“连续”键，DVM 便进入连续取样状态，“单次”指示灯熄灭。在“只讲”方式不能进入单次测量方式。

### 6) 测量最大值/最小值

PZ115A 型数字电压表具有显示最大值/最小值功能。按“换挡”键后按“最大/最小”键，DVM 进入显示最大值方式，“最大值”指示灯亮；如果再按“换挡”键后按“最大/最小”键，进入显示最小值方式，“最小值”指示灯亮。在显示最大值或最小值状态，显示器始终显示测量过程中出现的最大值或最小值。

在 DVM 处于自动量程方式、“只讲”方式时，不能进入最大值、最小值测量状态。

### 7) 极限判别

PZ115A 型数字电压表具有极限判别功能。在进入极限判别测量之前，用户需要设置被测量的上限和下限。在极限判别测量状态下，显示器显示出上下限之间的值。如果测量值大于上限值，显示器显示“H”，测量值小于下限值，显示器显示“L”。当 DVM 工作于“只讲”方式并连接一个“只听”打印机时，大于上限或小于下限的值被打印机打印输出。

进入极限判别态的操作过程是：按“极限”键，显示器显示“H”，提示用户输入上限值，用户按“换挡”键和数字键输入上限值，再按“置数”键把送入显示器的上限值置入。随后，显示器显示“L”，提示用户输入下限值，用户按数字键输入下限值，再按“置数”键把送入显示器的下限值置入。一旦上下限值置入，该 DVM 就进入极限判别测量态。在极限判别态时，再按“极限”键则退出极限判别态。

## 9.4 自动测试系统、个人仪器与虚拟仪器

### 9.4.1 自动测试系统

自动测试系统（ATS，Automatic Test System）是计算机技术和测试技术相结合的产物，是以通用计算机为核心，以标准接口总线为基础，由可编程电子仪器（智能仪器）等构成的现代测试系统。典型自动测试系统如图 9.13 所示。

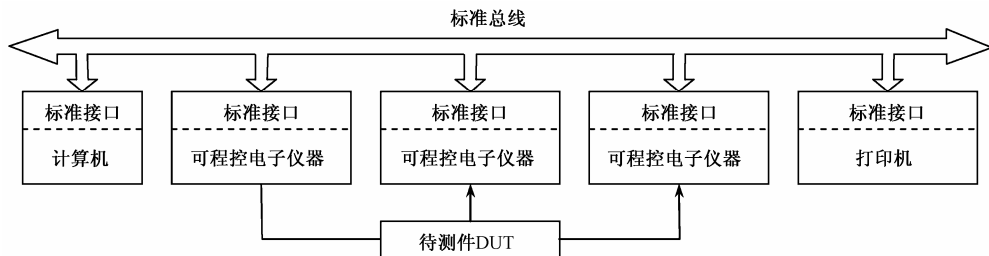


图 9.13 典型自动测试系统组成

一个自动测试系统由计算机、多台可编程仪器及 GPIB 接口组成。计算机是系统的控制者，通过执行测试软件，实现对测量全过程的控制及处理；各可编程电子仪器是测试系统的执行单元，完成采集、测量、处理等任务；GPIB 接口用于把各种仪器设备有机地联接起来，



完成系统内的各种信息的变换和传输。

自动测试系统具有极强的通用性和多功能性,对于不同的测试任务,只需增减或更换“挂”在它上面的仪器设备,编制相应的测试软件,而系统本身不变。该系统适用于要求测量时间短而数据处理量极大的测试任务中。

### 9.4.2 个人仪器及系统

个人仪器 PI (Personal Instrument) 即 PC 仪器或仪器卡,是在智能仪器的基础上,伴随个人计算机(PC, Personal Computer)在电子测量领域中的应用而诞生的。个人仪器将传统智能仪器中的测量部分配以相应的接口电路制成各种仪器卡,插入到 PC 的总线插槽或扩展箱内,而传统智能仪器所需的控制、存储、显示和操作等任务均移交给 PC 承担。个人仪器系统则是由不同功能的仪器卡、插卡箱和一台 PC 有机结合而构成的自动测试系统。

#### 1. 结构形式

个人仪器及系统分为内插件式、模块式两种结构形式,如图 9.14 (a) 和图 9.14 (b) 所示。

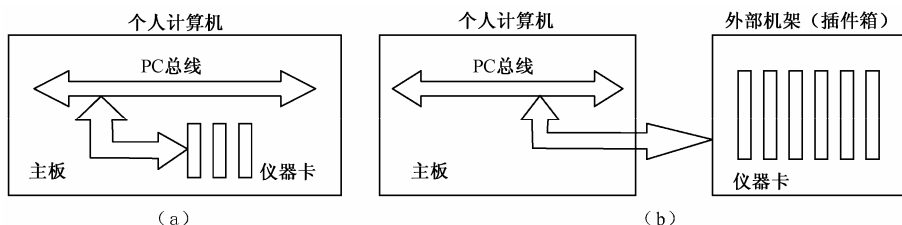


图 9.14 个人仪器及系统结构形式

内插件式将仪器插卡直接插入到 PC 内部的总线扩展槽内,是一种最简单的形式。内插件式具有结构简单、使用方便、成本低廉的优点,但有时难以满足仪器对电流和散热的要求,机内干扰较严重;在组成个人仪器系统时,因无专门为仪器定义的总线,各仪器之间不能直接通信,模拟信号也无法经总线进行传递,故内插件式个人仪器及系统性能较差。

模块式结构具有独立的机箱和独立的电源,可以使仪器免受机内噪声干扰;由于设有专门的仪器总线,可以方便地组成仪器系统;因为更换了与微机配合的接口卡,可适应多种个人计算机;而且系统中的仪器模块和接口电路也采用了微型计算机,故模块式个人仪器系统是一种功能强大的分布系统。

内插件式和模块式个人仪器及系统由于未采用统一的标准而不能兼容,因此出现了 VXI 仪器系统。VXI 仪器系统采用了 VXI 总线。VXI 总线是 VME Extension for Instrumentation 的缩写,即 VME 总线在仪器领域的扩展。VME (Versamodel Eurocard) 总线是由 Motorola 公司于 1981 年推出的第一代 32 位工业开放标准总线。由于 VXI 总线采用了用于仪器模块式插卡的新型互联标准,使得 VXI 总线可以为模块电子仪器提供一个开放的结构,所以不同厂家提供的 VXI 仪器系统的各种仪器模块均可以在同一主机箱内运行。VXI 仪器系统的详细内容参见有关书籍。

#### 2. 组成

个人仪器及系统由硬件、软面板及系统软件等组成。



### (1) 硬件组成

个人仪器及系统硬件由仪器插件通过总线与微机构成，仪器插件由接口和测量两大部分电路组成，如图 9.15 所示。

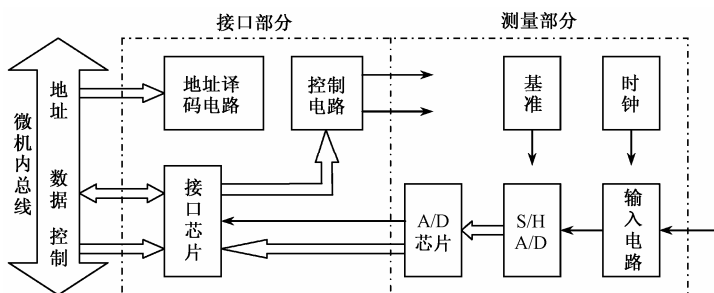


图 9.15 个人仪器硬件电路结构图

接口部分由接口芯片、地址译码电路、控制电路等部分组成，这与 PC 的一般功能接口卡的接口电路基本一致。测量部分电路一般包括输入电路、采样保持与 A/D 变换、数据传送、时钟与时钟等部分。

### (2) 软面板

软面板是显示在 CRT 触摸显示屏上由高分辨率作图生成的仪器面板图形。用户通过操作键盘、移动鼠标器光标或触屏等方式来选择软面板上的按键（软键），实现对个人仪器及系统的操作。

### (3) 系统软件

个人仪器系统一般有人工控制和程序控制两种控制方式，软件系统的一般结构如图 9.16 所示。

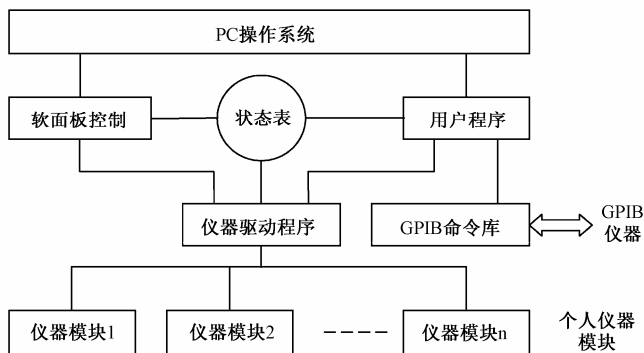


图 9.16 个人仪器控制系统示意图

在人工控制方式下，系统软件在微机屏幕上产生一个软面板，用户如同操作传统仪器一样，通过软面板选择功能、量程以及输入有关参数，建立起相应的状态标志提供给仪器驱动程序。软面板的键盘操作一般是以中断方式实现的，当用户按下一个键时，软面板就终止当前执行的功能，判断所按的键。如果按下错误的键就发出声响，以提醒用户；如果按下正确的键，或显示所选参数，或与仪器驱动程序模块进行通信来执行某项操作并实时显示测量结果。

在程序控制方式下，为了方便用户编制测试程序进行自动测试，系统软件提供易记好学的高级命令。用户只需按照语句格式进行编程即可。



仪器驱动程序是最底层的软件，是与 PC 仪器硬件直接联系的软件模块，无论人工操作方式或程序操作方式都要调用仪器驱动程序去执行输入/输出操作。仪器驱动程序是直接面向硬件的，实时性强，程序执行速度要求快，一般采用汇编语言编写。

### 9.4.3 虚拟仪器

虚拟仪器（VI，Virtual Instrument）又称为集成仪器，是指在通用计算机上添加几种带共性的基本仪器硬件模块，通过软件组合成各种功能的仪器或系统仪器。虚拟仪器的激励信号则是由微机产生的数字信号经 D/A 变换器产生的模拟信号。许多测试功能可以通过对被测信号的采样，经 A/D 变换后实现。数据分析与处理显示等功能还可以完全由软件来实现，从而摆脱由硬件构成一件件仪器再连成系统的传统模式。故从某种意义上说，计算机就是仪器，软件就是仪器。

虚拟仪器由计算机、A/D 及 D/A 等带共性的硬件资源和应用软件共同组成。

#### 1. 硬件结构

传统智能仪器由数据采集、数据分析与处理，以及存储、显示或输出等三部分组成。它们的作用分别是：将输入的模拟信号波形进行采样与整理，并经 A/D 变换成为数字信号以待处理；由微处理器按照功能要求，对采集的数据作必要的分析和处理；将处理后的数据存储、显示或经 D/A 变换成模拟信号输出。传统智能仪器一般只有一种功能或数种功能。而虚拟仪器是将具有上述一种或多种功能的通用模块组合起来，通过编制不同的测试软件来构成任何一种仪器而不是某几种仪器。例如，一块数据采集（DAQ，Data Acquisition）卡可以完成 A/D、D/A 变换、数字输入/输出、计数器/定时器等多种功能，再配以相应的信号处理电路组件，即可组成能构成各种虚拟仪器的硬件平台。

由于受器件和工艺水平等方面的限制，现阶段虚拟仪器的硬件系统还使用原有的能与计算机通信的各类仪器，例如，带有 GPIB 接口或 RS-232 接口的仪器与仪器卡等。现阶段虚拟仪器硬件系统结构基本框图如图 9.17 所示。

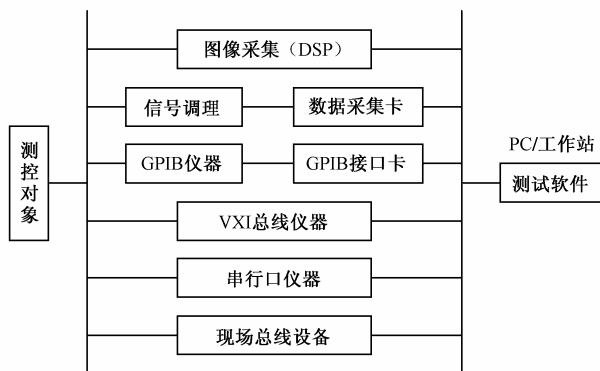


图 9.17 虚拟仪器硬件结构框图

#### 2. 软件体系结构

典型的虚拟仪器软件产品有 NI（National Instrument）公司的 LabVIEW 和 LabWindows、HP 公司的 HP VEE 和 HP TIG、Tektronix 公司的 Ez-Test 和 Tek-TNS 等。

LabVIEW（Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench）是美国 NI 公司研制的一



个具有直观界面，便于开发，易于学习且具有多种仪器驱动程序和工具功能强大的大型仪器系统开发工具。其软件体系结构如图 9.18 所示。

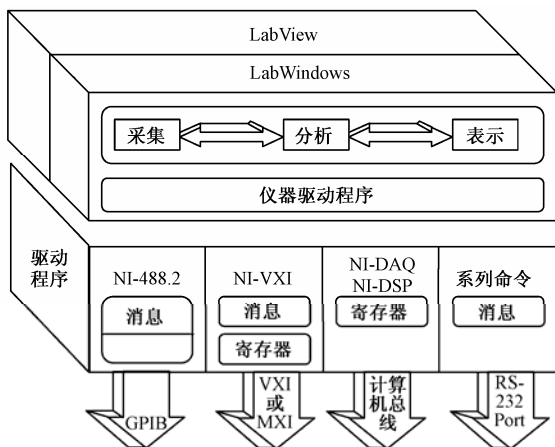


图 9.18 LabVIEW 和 LabWindows 软件体系结构

仪器驱动程序主要完成仪器硬件接口功能的控制。有了仪器驱动程序，用户就不必精通这些仪器的硬件接口，而只要把仪器的用户接口代码及数据处理与分析软件组合在一起，即可迅速而方便地构建一台新的虚拟仪器。

LabVIEW 采用工程人员所熟悉的术语、图标等图形化符号来代替常规的基于文字的程序语言，具有简单、直观、易学的图形编程特点。它的基本程序单元是 VI。LabVIEW 可通过图形编程的方法建立一系列的 VI 来完成用户指定的测试任务。例如，简单的测试任务可由一个 VI 完成。对于一项复杂的测试任务，可以分解为一系列的子任务或多项小任务，分解后的任务则由一个相当于常规程序中的一个程序模块的 VI 完成。

每个 VI 有两个工作界面，即前面板（Front Panel）和框图程序（Block Diagram）。前面板是用户进行测试工作时的输入/输出界面，如仪器面板等。用户可以通过控制（Control）模板选择多种输入控制部件来构成前面板，其中控制部件是用于接收用户的输入数据到程序，指示部件是用来显示程序产生各种类型的输出。框图程序是用户用图形编程语言编写程序的界面，用户可根据预定的测试方案通过功能（Functions）模板的选项，选择不同的图形化节点（Node），然后用连线的方法把这些连接起来，即可构成所需要的框图程序。



## 本章小结

本章简要介绍了智能仪器的组成、工作原理及有关使用方面的知识。

- (1) 具有人工智能的现代测试仪器和系统主要有独立智能仪器、个人仪器、自动测试系统和虚拟仪器等。
- (2) 独立智能仪器是自身带有微处理器，能独立进行测试的电子测量仪器。
- (3) 自动测试系统是以通用计算机为核心，以标准接口总线为基础，由可控控电子仪器等构成的现代测试系统。自动测试系统具有极强的通用性和多功能性。
- (4) 个人仪器系统属于第二代自动测试系统，是由不同功能的仪器卡、插卡箱和一台 PC 有机结合而构成的自动测试系统。它分为内插件式、模块式两种结构形式，二者的兼容性较差。兼容性好的是 VXI 仪器





系统。个人仪器及系统由硬件、软面板及系统软件三部分组成。

(5) 虚拟仪器属于第三代自动测试系统，是指在通用计算机上添加几种带共性的基本仪器硬件模块，通过软件组合成各种功能的仪器或系统，由计算机、A/D 及 D/A 等带共性的硬件资源和应用软件共同组成。

(6) 智能仪器由硬件和软件两大部分组成。硬件包括主机电路、模拟量输入输出通道、人机接口和标准通信接口电路等。软件即程序，包括监控程序和接口管理程序两部分。

(7) “控者”、“听者”、“讲者”是智能仪器的三要素，当中的某一装置可以具有三要素中的一个、两个或全部功能。

(8) GPIB 标准接口总线是一条 24 芯电缆，其中 16 条被用作信号线，其余则被用作逻辑地线及屏蔽线。

(9) 接口功能是指完成各仪器设备之间正确通信，确保系统正常工作的能力。包括服务请求功能、并行点名功能、远控本控能力、装置触发功能、装置清除功能等。

(10) 智能仪器有自检、自动测量等诸多功能。自动测量功能包括：自动量程变换、自动零点调整、自动校准以及自动触发电平调节等功能。

(11) 智能 DVM 是指以微处理器为核心的数字电压表。由微处理器芯片、程序存储器和数据存储器、输入电路、A/D 变换器、键盘、显示器及标准仪用接口电路等组成。

(12) 智能 DVM 除了具有普通 DVM 的各项性能指标外，还有标定、相对误差、极限、比例、统计、最大/最小等功能指标。



## 习题 9

1. 智能化测试仪器和测试系统主要有哪几种？参考有关的资料说明它们的发展历史与趋势。
2. 智能仪器的自检方式有哪些？有哪些自动测量功能？
3. 智能仪器如何实现输入电流的补偿？
4. 结合学过的内容，谈谈智能仪器如何实现 A/D 变换？
5. 自动测试系统、个人仪器及系统、VXI 仪器系统、虚拟仪器之间有什么联系与区别？各自的组成是怎样的？

# 附录



## 附录A 实验指导书

---

### A.1 电子测量与仪器认识实验

#### 1. 实验目的

- 熟悉以前用过的仪器，明确各仪器的功能。
- 了解本学期要使用的仪器及其功能，熟悉仪器主要开关旋钮的名称与作用。
- 对电子测量仪器设备建立感性认识，明确学习目的。

#### 2. 实验预习要求

- 复习学过的有关内容，了解用过的仪器及其功能。
- 写出实验预习报告。
- 查阅有关的资料，翻译下列单词（是英文缩写的还应找出其英文全称）：POWER FUNCTION FREQ MULT DUTY INV OFFSET ADJ TTL CMOS AMPL OUTPUT INPUT VCF MAX MIN。

#### 3. 实验器材设备

低频信号发生器、函数信号发生器、示波器、毫伏表、频谱仪、扫频仪、计数器、晶体管特性图示仪、电桥、Q 表、直流稳压电源各 1 台，配套测试线若干条。

#### 4. 实验内容与步骤

- （1）了解实验室内所有仪器名称与功能，按照功能不同对仪器进行分类。
- （2）初步了解各仪器设备主要开关旋钮的名称与作用。
- （3）了解低频信号发生器、函数信号发生器的功能及开关旋钮的名称与作用。通过观察有关符号标记说明其输出信号波形的种类、输出信号频率范围等主要技术指标。
- （4）画出函数信号发生器面板结构图，对照英文单词，说明各开关旋钮的功能。
- （5）了解毫伏表的功能及开关旋钮名称与作用，通过有关符号标记说明其频率范围、电压量程等主要技术指标。
- （6）简要列出示波器、频谱仪、扫频仪、晶体管特性图示仪、电桥、Q 表等的测试功能。
- （7）实验完毕，整理实验器材设备，填写实验记录。



## 5. 思考题

- (1) 查阅有关资料，说明调节函数信号源“TTL”、“CMOS”输出现象是怎样的？
- (2) 根据理论学习，试分析说明怎样调节输出频率？

### A.2 低频信号发生器的使用

#### 1. 实验目的

- 熟悉低频信号发生器的组成及工作原理。
- 明确低频信号发生器各开关旋钮的作用，学会使用低频信号发生器。
- 了解低频信号发生器常用技术指标。
- 初步了解示波器的使用。

#### 2. 实验预习要求

- 复习低频信号发生器的有关内容，预习示波器的使用。
- 写出实验预习报告。
- 查阅有关资料，翻译下列单词：AUDIO GENRATER FREQ RANGE ATTENUATOR AMPLITUDE MIN MAX OUTPUT POWER ON OFF。

#### 3. 实验器材设备

低频信号发生器（GAG-808G 型）、示波器（Y-TEKTRONIX2261 型）、毫伏表（AS2292 型）、计数器（NFC-100 型，可选）各 1 台，探极与配套测试线若干条。

如无特别说明，其他实验中相同类型仪器的型号与本实验中的相同。

#### 4. 实验原理

信号发生器即信号源，在电子测量中，信号发生器用来为其他设备或电路提供测试用的信号。按照信号发生器提供信号波形的不同，信号发生器分为正弦信号发生器、函数信号发生器、脉冲信号发生器、随机信号发生器（即噪声信号发生器）和扫频信号源。

低频正弦信号源又称为低频信号源或音频信号源，低频信号发生器主要由主振器、电压放大器、输出衰减器、功放、阻抗变换器等组成。在测量工作中，低频信号发生器用来提供 1~10MHz 正弦信号。

#### 5. 实验内容与步骤

- (1) 熟悉低频信号发生器、示波器面板上的开关旋钮，了解其作用。
- (2) 调整毫伏表量程为最大，按图 A.1 所示连接仪器。

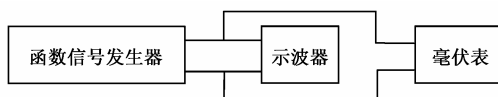


图 A.1 信号发生器、示波器、毫伏表连接图

(3) 调整低频信号发生器开关旋钮，使之输出 1kHz 的正弦波，调整示波器的开关旋钮分别显示出稳定的对应波形。调整低频信号发生器的各个开关旋钮，并适当调整示波器开关



旋钮,观察示波器上显示的波形有无变化?有什么变化?记录后加以说明。观察波形的同时,适当调整毫伏表量程,并记录下毫伏表指示的数值,观察有无变化?

(4) 调整低频信号发生器幅度调节和衰减开关,用毫伏表估测信号发生器输出 1kHz 正弦波的电压范围是?

(5) (可选) 了解电子计数器有关开关旋钮的使用,利用计数器估测低频信号发生器输出 1kHz 正弦波时的实际频率? 计算此时的频率准确度 ( $\frac{f_0 - f_x}{f_x}$ ) ? 式中  $f_0$ 、 $f_x$  分别为计数器测得的频率、信号发生器的频率标称值。

(6) 调整信号发生器的开关旋钮使之输出 1kHz 方波,重复步骤 (3)、(4)。

(7) 改变信号发生器开关旋钮使之分别输出 10kHz 正弦波和方波,重复步骤 (3)、(4)。

(8) 实验完毕,整理实验器材设备,填写实验记录。

## 6. 说明

为了正确快速地在示波器上调出稳定波形,可以按以下步骤调整示波器有关开关旋钮。

(1) 将被测信号加至示波器 CH<sub>1</sub> 输入端。

(2) 选择 Y 通道工作方式为 CH<sub>1</sub>, 选择输入耦合方式为 AC 或 DC, 选择触发源为 CH<sub>1</sub>, 选择触发耦合方式为 DC (或 AC)、NORM, 选择自动扫描 (AUTO)。

(3) 调整 VOLTS/DIV 使显示波形幅度合适, 调整 s/DIV 使显示波形或亮带不闪烁。

(4) 调整触发电平 (LEVEL) 旋钮直到波形显示稳定 (触发扫描指示灯点亮) 为止, 若仍不稳定, 可以调小 VOLTS/DIV, 或改变探极为 1:1, 或增大输入信号。调整过程中注意不断调整触发电平旋钮和 s/DIV, 使波形宽度合适稳定。

(5) 如果改为 CH<sub>2</sub> 输入, 则将以上步骤中的 CH<sub>1</sub> 改为 CH<sub>2</sub>。

## 7. 思考题

(1) 示波器显示波形的幅度会因为调整 VOLTS/DIV 而产生变化, 表明低频信号发生器输出信号的幅度产生了变化。上述说法正确吗? 为什么?

(2) 示波器显示波形的宽度会因为调整 s/DIV 而产生变化, 表明低频信号发生器输出信号的频率产生了变化。上述观点是否正确? 为什么?

## A.3 函数信号发生器的使用

### 1. 实验目的

- 熟悉函数信号发生器的组成及工作原理。
- 明确函数信号发生器各开关的作用, 学会使用函数信号发生器。
- 了解函数信号发生器的常用技术指标。
- 了解示波器的使用。

### 2. 实验预习要求

- 复习函数信号源的有关内容, 预习示波器的有关内容。
- 写出实验预习报告。
- 查阅有关的词典, 翻译下列单词 (是英文单词缩写的还应查出其英文全称): POWER FUNCTION FREQ MULT OUTY INV OFFSET ADJ TTL CMOS AMPL OUTPUT



INPUT VCF MAX MIN。

### 3. 实验器材设备

函数信号发生器（AS101D 型）、示波器、毫伏表、计数器（可选）各 1 台，配套测试线若干条。

### 4. 实验原理

函数信号发生器是一种多波形信号源，能够产生某些特定的周期性时间函数波形，如正弦波、方波、三角波，通过调整波形的占空比等参数还可以产生锯齿波、矩形波（宽度和重复周期可调）、正负尖脉冲波等波形。函数信号发生器利用波形变换电路将方波、正弦波或三角波变换成为其他波形。

### 5. 实验内容与步骤

（1）熟悉函数信号发生器、示波器面板上的开关旋钮，了解其作用。

（2）分析如图 A.1 所示的连接仪器。

（3）调整函数信号发生器的开关旋钮使之输出 1kHz 的正弦波，调整示波器的开关旋钮使之显示出稳定的波形；调整函数信号发生器的各个开关旋钮，并适当调整示波器的开关旋钮，观察示波器上显示的波形有无变化？有什么变化？记录后加以说明；观察波形的同时，记录下毫伏表指示的数值，观察有无变化？

（4）调整函数信号源幅度调节旋钮，用毫伏表估测函数信号源输出 1kHz 正弦波的电压范围？

（5）（可选）利用计数器估测函数信号发生器输出 1kHz 正弦波时的实际输出信号频率？

（6）改变函数信号源输出为 1kHz 方波，重复步骤（3）、（4）。

（7）用示波器观测着调整信号发生器的开关旋钮（DUTY），使之输出占空比为 1:5 的矩形波，重复步骤（3）、（4）。占空比为脉宽与周期之比。

（8）实验完毕，整理实验器材设备，填写实验记录。

### 6. 说明

为了正确使用电子计数器测频，可以按以下步骤调整电子计数器有关开关旋钮。

（1）被测信号利用同轴电缆线经 INPUT 端输入电子计数器，注意被测信号不能太小。

（2）选择电子计数器为测频（FREQ）功能。

（3）根据显示数据位数的多少，选择合适的时基按钮（FREQ MEASURE TIME），如 10ms，0.1s，1s，10s。

### 7. 思考题

（1）（可选）利用计数器测量函数信号发生器输出频率时，发现计数器的显示很难稳定不变，试回答产生这种问题的原因？

（2）根据调节函数信号源“TTL”、“CMOS”时出现的现象分析说明二者的区别。



## A.4 电压表的使用

### 1. 实验目的

- 熟悉模拟式电压表的组成及原理。
- 明确模拟式电压表的类型、适用范围及其刻度特性。
- 学会使用模拟式电压表测量不同波形电压。

### 2. 实验预习要求

- 复习电压表有关内容，明确电压表分类、组成与功能。
- 复习不同类型模拟式电压表刻度特性，学会对其读数值的修正。
- 复习示波器、信号源有关实验，熟悉其使用。
- 写出实验预习报告。

### 3. 实验器材设备

函数信号发生器（或低频信号发生器）、示波器、毫伏表（均值电压表）各 1 台，配套测试线若干条。

### 4. 实验原理

电压表是三大电测仪器之一。交流电压表按其刻度特性分为均值电压表、峰值电压表和有效值电压表。使用较普遍的是均值电压表，其结构类型为放大—检波式。

均值电压表和峰值电压表测量正弦波时的读数等于正弦波的有效值；而测量非正弦波时的读数无实际物理意义，应注意对读数进行修正。

### 5. 实验内容与步骤

（1）熟悉示波器、函数信号源、毫伏表面板结构，了解各开关旋钮作用及使用。选择毫伏表量程为最大。

（2）按图 A.1 所示连接有关仪器设备。

（3）调整示波器有关开关旋钮，使之显示波形稳定后，再调整信号源有关开关旋钮使之在示波器上显示不失真的频率为 1kHz 的正弦波，选择合适的毫伏表量程，读出电压表读数（设为  $U_\alpha$ ）。

（4）将示波器 VOLTS/DIV 微调旋钮置于“校准（CAL）”位置，读出显示正弦波峰峰点之间的垂直格数（设为  $H_{p-p}$ ）。在测量误差允许范围内，看是否满足  $U_\alpha = \frac{H_{p-p} \cdot \text{VOLTS/DIV}}{2\sqrt{2}}$ ？

若满足，表明测量正确；否则，需要重测。

（5）改变信号源输出为 1kHz 方波，重复步骤（3）、（4）。在测量误差允许的范围内，看是否满足  $U_\alpha > \frac{H_{p-p} \cdot \text{VOLTS/DIV}}{2}$ ？若满足，表明测量正确；否则，需要重测。

（6）改变信号源输出为 1kHz 三角波，重复步骤（3）、（4）。在测量误差允许的范围内，看是否满足  $U_\alpha < \frac{H_{p-p} \cdot \text{VOLTS/DIV}}{2\sqrt{3}}$ ？若满足，表明测量正确；否则，需要重测。

（7）试着改变信号输出 10kHz 正弦波、方波和三角波，重复步骤（3）～（6），看是否



满足上述规律，为什么？

（8）实验完毕，整理实验器材设备，填写实验记录。

## 6. 思考题

（1）总结说明使用电压表（AS2292 型）有什么规律？说明该电压表属于均值电压表、峰值电压表还是有效值电压表？其电路结构形式又是怎样的？

（2）使用不同类型电压表时，应该注意什么问题？

## A.5 示波器认识实验

### 1. 实验目的

- 初步了解示波器组成及工作原理，对示波器建立感性认识。
- 了解示波器的特性及使用。
- 了解示波器面板结构，熟悉有关开关旋钮及实现方法。

### 2. 实验预习要求

- 复习前面的实验及所翻译的单词，回顾示波器使用的方法。
- 预习课本有关内容，了解示波器的组成及其工作原理。
- 写出实验预习报告。

### 3. 实验器材设备

低频信号发生器、示波器、毫伏表各 1 台，探极与配套测试线若干条。

### 4. 实验原理

电子示波器是应用最广泛的电子测量仪器，可以用来显示波形或当作 X-Y 图示仪使用。可利用显示波形或图形测量电压、频率、相位差、周期等参量。

示波器主要由 X、Y、Z 通道组成。示波管内的电子束在 Y 方向的被测信号和 X 方向的扫描锯齿波共同作用下显示出被测信号的波形，扫描锯齿波一般经被测信号触发由示波器内部电路产生。如果 X、Y 方向所加信号均为外加的输入信号，则示波器当作 X-Y 图示仪使用。

Y-TEKTRONIX2261 型示波器为 20MHz 双踪示波器，既可以工作于扫描方式，当作双踪示波器使用，又可以工作于 X-Y 方式，当作 X-Y 图示仪使用。双踪示波器 Y 通道有 CH<sub>1</sub>、CH<sub>2</sub>、ADD、ALT、CHOP 五种工作方式，分别显示 CH<sub>1</sub>、CH<sub>2</sub>、ADD 波形，以及 CH<sub>1</sub>、CH<sub>2</sub> 波形的交替显示与断续显示。ADD 显示时，如果将 CH<sub>2</sub> 信号倒相(INVERT)可以实现 CH<sub>1</sub>-CH<sub>2</sub> 波形的显示；否则，显示的是 CH<sub>1</sub>+CH<sub>2</sub> 的波形。

### 5. 实验内容与步骤

- （1）画出示波器面板结构图，注意开关旋钮的分布区域是怎样的？
- （2）分析如图 A.1 所示的连接仪器。
- （3）调整信号发生器使其输出频率为 1kHz、大小为 1V（毫伏表读数）的正弦波。
- （4）按照 A.2 的说明，调整示波器有关开关旋钮使显示波形稳定、大小合适。
- （5）依次改变示波器各个开关旋钮（如辉度、聚焦、水平移位、垂直移位、输入信号耦合方式、五种 Y 通道工作方式、触发信号源、扫描方式、触发电平、触发信号极性选择等）

而其他的旋钮保持不变，注意观察显示波形有无变化，并从中总结各个开关旋钮的作用。填写表 A-1。

表 A-1 A.5 实验用表 1

开关旋钮的名称			作用或现象说明						
汉语	英文								
辉度			INTENSITY						
聚焦			FOCUS						
垂直移位			VERTICAL						
水平移位			HORIZONTAL						
触发电平			LEVEL						
触发极性			SLOPE						
输入信号倒相			INVERT						
输入信号 耦合方式	接地	GND							
	直流	DC							
	交流	AC							
显示方式	信道 1	CH <sub>1</sub>							
	信道 2	CH <sub>2</sub>							
	交替	ALT							
	断续	CHOP							
	叠加	ADD							
触发 信号源	信道 1	CH <sub>1</sub>							
	信道 2	CH <sub>2</sub>							
	电源	LINE							
	外加	EXT							
触发信号 耦合方式	标准	NORM							
	视频	TV							
	交流	AC							
	直流	DC							
扫描方式	标准	NORM							
	自动	AUTO							
	单次	SGL							
“X-Y”工作方式		X-Y							
探极衰减 比	1:1								
	10:1								
轴线校正		TRACE ROTATION							
触发扫描指示		READY TRIG'D							
标准信号输出		PROBE ADJUST	幅度		周期				
示波器型号									
荧光屏有效 尺寸(宽×高)		频宽 (MHz)		输入 阻抗	R <sub>i</sub> (MΩ)		量程 (V)		
			C <sub>i</sub> (pF)						

（6）再次调出大小合适、波形稳定的波形，将 VOLTS/DIV 细调旋钮置于“校准（CAL）”





位置，调节 VOLTS/DIV 旋钮，并保持其他旋钮，记录不同 VOLTS/DIV 时，显示波形的峰峰点间距离（单位为 DIV） $H_{p-p}$  及毫伏表显示的数值，注意发现其中有什么规律？设探极衰减比为  $K:1$ ，填表 A-2 如下。

表 A-2 A.5 实验用表 2

VOLTS/DIV	峰峰点间距 $H_{p-p}$ (DIV)	毫伏表显示值 $U_a$ (V)	是否满足等式 $U_a = \frac{H_{p-p} \times \text{VOLTS/DIV} \times K}{2\sqrt{2}}$

(7)步骤(6)中改变 VOLTS/DIV 细调旋钮，保持其他旋钮不变，注意观察改变 VOLTS/DIV 细调旋钮对显示波形有什么影响？影响的最大程度是如何的？

(8)再次调出大小合适、波形稳定的波形，将 s/DIV 细调旋钮置于“校准(CAL)”位置，除了改变 s/DIV 旋钮外，其他的旋钮保持不变，分别记录下不同 s/DIV 时，显示波形一个周期所占的格数是多少?注意发现其中的规律？填写表 A-3。

表 A-3 A.5 实验用表 3

s/DIV	一个周期所占格数 $L_T$ (DIV)	已知波形频率 $f$ (Hz)	是否满足等式 $f \times L_T \times s/\text{DIV} = 1$

(9) 步骤（7）中除了改变 s/DIV 细调旋钮外，保持其他旋钮不变，注意观察改变 s/DIV 细调对波形有何影响？影响的最大程度是如何的？

(10) 实验完毕，记录数据，整理仪器。

6. 思考题：

- (1) 所用示波器属于什么类型的示波器？
- (2) 示波器是由哪几部分组成的？根据课本内容画出其简单组成框图，并说明各部分的主要作用？
- (3) 如何实现两个信号相减的叠加显示？

A.6 示波器的应用

1. 实验目的

- 进一步熟悉示波器的组成原理与使用。
- 理解示波器实际的扫描过程。
- 学会利用示波器测量交流信号的大小、周期（或频率）与相位差等。
- 了解示波器 X-Y 方式的使用、李沙育图形形成的原理。



## 2. 实验预习要求

- 复习前面的实验及所翻译的单词，回顾示波器使用的方法。
- 复习有关示波器波形显示原理及示波器的应用部分的内容。
- 写出实验预习报告。

## 3. 实验器材设备

示波器、毫伏表各 1 台，低频信号发生器 2 台，探极与配套测试线若干条。

## 4. 实验原理

电子示波器偏转系统由两对相互垂直的 X（水平）、Y（垂直）偏转板组成，分别控制电子束水平方向、垂直方向的偏转，电子束的偏转距离分别与加在偏转板上的电压大小成正比，该特性称为阴极射线示波管的线性偏转特性。

为了显示出被测信号的波形，扫描电压和被测信号电压分别加在示波管 X 和 Y 偏转板上。扫描电压是与时间成正比的锯齿波，因此，电子束在水平方向上的偏转距离与时间成正比，这是示波器测量时间、周期、相位差等的原理依据。改变扫描电压的大小，可以调整显示波形的宽度。被测信号变换后加在 Y 偏转板上，使电子束产生与信号电压成正比的偏移，这是示波器测量电压等的原理依据。改变 Y 偏转板上的信号电压大小，可以调整显示波形的幅度。

当电子示波器工作在“X-Y”方式时，示波器 X 偏转板上所加的信号不再是扫描电压而是外加的 X 信号，该信号与 Y 信号各自独立地在 X 和 Y 偏转板间建立偏转电场对电子束共同作用而产生一个新的图形，例如，将两个同频正弦波加到示波器上时，得到的波形为椭圆、圆或直线，两个正弦波加到示波器得到的图形称为李沙育图形。

## 5. 实验内容与步骤

### （1）测量交流电压

- ① 如图 A.1 所示，将示波器探极、信号源输出、毫伏表输入的高低端分别并联。
- ② 在毫伏表观测下，调整低频信号发生器使之输出大小为 1V、频率为 1kHz 的正弦波。
- ③ 调整示波器使之显示波形的幅度、宽度合适便于观测，记录显示出的正弦波正负峰点间的距离  $H_{p-p}$ （单位为 DIV）、VOLTS/DIV（注意将 VOLTS/DIV 细调旋钮调至“校准（CAL）”位置）各是多少？计算峰峰值电压  $U_{p-p}=H_{p-p} \cdot \text{VOLTS/DIV}$ ，并验证  $H_{p-p} \cdot \text{VOLTS/DIV} / 2\sqrt{2} = U_a$ （ $U_a$  为毫伏表测出的正弦波电压）是否成立。

### （2）测量周期（或频率）

分别记录荧光屏上正弦波一个周期水平距离  $L_T$ （单位为 DIV）及选用的 s/DIV（注意 s/DIV 细调旋钮放在“校准（CAL）”位置）各是多少？验证是否满足被测正弦波周期  $T=L_T \cdot \text{s/DIV}$ ， $f=1/T$ 。

- ③ 改变低频信号发生器使之输出 1kHz、1V 的方波，重复步骤（1）、（2）。

### （4）测量直流电压

- ① 利用万用表观察着调整直流电源使之输出 1V 直流电压。
- ② 断开图 A.1 的连接，将示波器探极与直流电源相接。
- ③ 示波器输入耦合方式选为 GND、扫描方式选为 AUTO 扫描、VOLTS/DIV 细调置于“校准（CAL）”。



④ 选 DC 输入耦合方式, 确定出时基线相对于 GND 耦合时垂直方向上的变化方向及大小。

⑤ 计算直流电压  $U = \text{VOLTS/DIV} \times H_Y \times K$ , 看是否等于 1V。

#### (5) 测量相位差

① 选择合适的电阻、电容以保证两个信号在荧光屏上的显示不重叠, 如图 A.2 (a) 所示连接示波器探极。注意, 因为示波器两个探极的负极已通过内部电路连接, 所以应将两探极的负极连接于一点, 即其中一个输入倒相, 以避免短接其中一个输入端。

② 调整信号源输出使之输出频率为 1kHz, 大小合适的正弦波。

③ 示波器垂直工作方式为 ALT 或 CHOP (注意选择相位超前的信号为触发源), 调整示波器有关开关旋钮得到两个稳定的正弦波。用双踪法测出显示信号的相位差  $\Delta\varphi_1$  见式 4-5, 则相位差  $\Delta\varphi = 180^\circ - \Delta\varphi_1$ , 而且显示超前的波形变为滞后; 或者利用倒相开关将 CH2 信号倒相后, 直接测量二者的相位差  $\Delta\varphi$ 。

④ 调节 s/DIV 使示波器工作于 X-Y 方式, 可以得到一个稳定的椭圆, 利用椭圆法测出两个信号的相位差, 并与步骤③的结果比较, 看是否相等。

⑤ 按下步骤④中 CH<sub>2</sub> 的 INVERT, 看椭圆的倾斜方向有什么变化, 并计算相位差。

⑥ 改变步骤⑤中的 s/DIV, 利用扫描法测出步骤⑤中信号的相位差, 并验证是否与步骤⑤的结果相同。

⑦ 如图 A.2 (b) 所示连接线路, 重复步骤①~⑥。

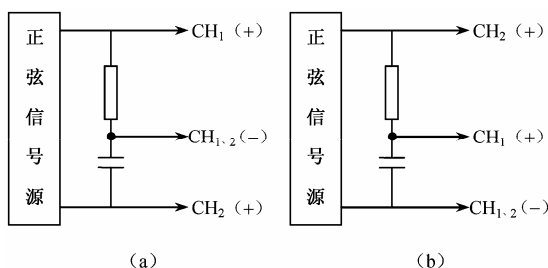


图 A.2 示波器测量相位差的连接图

#### (6) 观察李沙育图形

将两台信号发生器的输出与示波器 X 和 Y 端连接, 调节两台信号发生器输出大小合适的正弦波, 并分别以其中的一个信号为基准调整另一信号的频率以得到较稳定的李沙育图形。找出李沙育图形与垂直线、水平线的交点数和频率的关系是什么? 注意, 因为两个信号相位差不固定, 所以李沙育图形会晃动或旋转, 应耐心调整信号频率。

#### (7) 观察亮度调制现象

将步骤 (6) 中一个信号源的输出通过同轴电缆线接至示波器后面板 Z 输入端, 调整示波器有关开关旋钮使之显示稳定合适的另一个信号源的输出波形。调整第一个信号源输出方波或正弦波, 并调节其输出信号的大小与频率, 观察显示波形的亮度变化情况, 并确定两信号频率比与显示图形亮暗线段对数的关系? 注意, 因为两个信号的相位差不固定, 显示出的亮暗线段会出现移动。

#### (8) 观察不消隐时, 示波器实际显示的波形, 分析扫描的实际过程

将信号源输出端与示波器输入端相接, 调节信号源使之输出正弦波或方波。反复调节信



号源输出波形的频率与大小,以及示波器辉度调节、s/DIV 等有关开关旋钮,在保证显示波形稳定的情况下,有时会得到具有回扫线、休止线的波形。

为了保证能够得到具有回扫线、休止线的波形,亦可以在示波器 Z 输入端加一大小合适的负极性直流电压(针对 Y-TEKTRONIX2261 型而言)。

(9) 实验完毕,记录数据,整理仪器设备。

## 6. 思考题

(1) 已知在利用示波器测量被测信号的周期时,s/DIV 旋钮的指示不准确,请问如何不借助其他仪器正确的测量出被测信号的周期?

(2) 直接测量电压时,为什么要将 VOLTS/DIV 细调置于“校准(CAL)”位置?怎样测量含直流成分交流波形的大小?

(3) 如果回扫线和休止线不能被消隐,实际显示出的波形如何?为什么会带有回扫线、休止线?试解释出现的现象。

(4) 为什么可以利用李沙育图形测量频率?谈一谈它的测量原理。

(5) 为什么在实验步骤(6)中显示的李沙育图形会出现旋转或摆动,而步骤(5)中却不会出现?

(6) 在观察亮度调制现象时,显示的波形为什么会出现亮暗线段移动?

## A.7 扫频仪的使用

### 1. 实验目的

- 了解扫频仪的工作原理与结构。
- 了解调谐放大器的幅频特性。
- 学会扫频仪各项技术指标的正确设置。
- 学会操作使用扫频仪。

### 2. 实验预习要求

- 复习频域测量与扫频仪的有关内容,熟悉频域测量原理、扫频仪使用方法。
- 详细阅读实验指导书,了解扫频仪的操作步骤,做好参数测试记录的准备。
- 写出实验预习报告。

### 3. 实验器材设备

BT-3 型扫频仪、电缆探头、被测电路(中频放大器)、电源及附属设备各 1 台(套),隔直电容、隔离电阻各 1 个,连接线若干条。

### 4. 实验原理

#### (1) 扫频仪的工作原理

扫频仪即频率特性测试仪是根据扫频法测量原理设计而成的,主要用于测量网络的幅频特性,并据此计算电路有关技术指标。

扫频仪是在示波器 X-Y 方式的基础上,增加扫描信号源、扫频信号源、检波探头等组成的。扫描信号源用于产生扫描电压。扫描电压除用于示波器水平扫描外,还是扫频信号的频率调制信号。扫频信号源即频率受控振荡器,在扫描电压控制下产生频率呈线性升高的等幅



正弦波（即扫频信号）送给被测电路。检波探头用于对被测电路的输出进行包络（峰值）检波，并将检波输出信号送往示波器使被测电路的幅频特性能够显示在荧光屏上。

频标信号形成电路、混频器与晶振等构成频标产生电路，用于产生进行频率标度的频标信号，以便读出各点对应的频率值。

## （2）扫频仪的使用

图 A.3 为 BT-3 型扫频仪前面板结构图，它的正确使用方法如下：

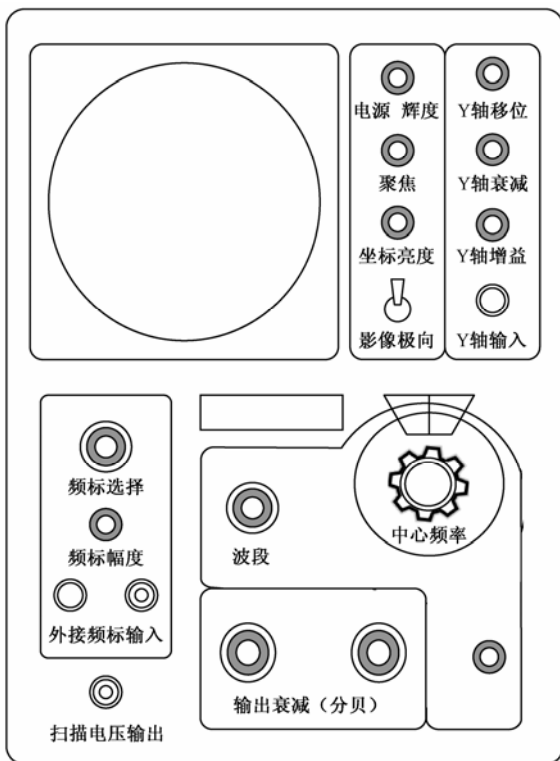


图 A.3 BT-3 型扫频仪前面板结构图

### 1) 检查示波器部分

检查项目有“辉度”、“聚焦”、“垂直移位”和“水平宽度”等。首先接通电源预热，调节“辉度”、“聚焦”、“Y轴位移”，得到辉度适中、细而清晰、可上下移动的扫描基线。

### 2) 扫频频偏的检查

调整频偏旋钮，使最小频偏为 $\pm 0.5\text{MHz}$ ，最大频偏为 $\pm 7.5\text{MHz}$ 。

### 3) 输出扫频信号频率范围的检查

将输出探头与输入探头对接，每一频段都应在荧光屏上显示一矩形方框。波段开关用于切换频段  $0\sim 75\text{MHz}$ 、 $75\sim 150\text{MHz}$ 、……、 $150\sim 300\text{MHz}$  三挡。

### 4) 检查内、外频标

将“频标选择”开关置“1MHz”或“10MHz”内频标，在扫描基线上应出现 1MHz 或 10MHz 的菱形频标，调节“频标幅度”旋钮菱形频标幅度应产生变化，调节“频偏”旋钮各频标间的相对位置应产生变化。若由外频标插孔输入标准频率信号，在示波器上应显示出该频率的频标。



### 5) 零频标的识别方法

频标选择放在“外接”位置,“中心频率”旋钮旋至起始位置,适当旋转按钮,在扫描基线上会出现一只频标——零频标。零频标比较特别,将“频标幅度”旋钮调至最小时仍能出现。

### 6) 检查扫频信号寄生调幅系数

用输出探头和输入探头分别与“扫频信号输出”和“Y轴输入”相连,将“输出衰减”的粗细衰减旋钮均置 0dB,选择内频标(如 1MHz),在荧光屏上会出现一个以基线为零电平的矩形图形,调整中心频率度盘,扫频信号和频标信号都会移动,调节显示部分各旋钮使图形便于观测,记下最大值 A、最小值 B,则扫频信号寄生调幅系数为  $m=(A-B)/(A+B)\times 100\%$ ,要求在整个波段内  $m\leq\pm 7.5\%$ 。

### 7) 检查扫频信号非线性系数

将“频标选择”开关置于“1MHz”,调节“频率偏移”为  $\pm 7.5\text{MHz}$ ,记下最低、最高频率与中心频率  $f_0$  的几何距离 A、B,则扫频信号非线性系数为  $\gamma=(A-B)/(A+B)\times 100\%$ ,要求在整个波段内  $\gamma\leq\pm 20\%$ 。

### 8) “1MHz”或“10MHz”频标的识别方法

找到零频标后,将波段开关置于“I”,“频标幅度”旋钮调至适当位置,将频标选择置于“1MHz”位置,则零频标右边的频标依次为 1MHz、2MHz…。将频标选择置于“10MHz”位置,则零频标右边的频标依次为 10MHz、20MHz…,两大频标之间的频率间隔 10MHz,大频标与小频标之间的频率间隔 5MHz。

### 9) 波段起始频标的识别方法

“频标幅度”旋钮调至适当位置,频标选择置于“10MHz”,调节“频率偏移”为最小。将波段开关置于“II”,旋转“中心频率”旋钮使扫描基线右移,直到不能移动为止,则荧光屏上对应的第一只频标为 70MHz,从左到右依次为 80MHz…150MHz。将波段开关置“III”,则荧光屏中对应的第一只频标为 140MHz。频标选择 1MHz 时的波段起始频标的识别方法与此相似。

### 10) 扫频信号输出的检查

将两个输出衰减均置 0dB。将输出探头与输入检波探头对接(即将两个探头的触针和外皮分别连在一起)。这时,在扫频仪的荧光屏上应能看到一个由扫描基线和扫描信号线组成的矩形图形。然后调整中心频率刻度盘,随着中心频率的变化,扫描信号线和频标均随之移动。要求在整个频段内的扫描信号线没有明显的起伏和畸变。并检查扫描信号的输出衰减和 Y 轴增益旋钮是否起作用。

### (3) 使用扫频仪的注意事项

① 测量时,输出电缆和检波探头的接地线应尽量短,切忌在检波头上加接导线;被测电路要注意屏蔽,否则容易引起误差。

② 当被测电路输出端带有直流电位时,Y轴输入应选用 AC 耦合方式;当被测电路输入端带有直流电位时,应在扫频输出电缆上串接容量较小的隔直电容。

③ 正确选择探头和电缆。BT-3 型扫频仪配有四种探头和电缆。

- 输入探头(检波头)适用于被测电路的输出未经检波电路时与 Y 轴输入端的连接。
- 输入电缆适用于被测电路的输出经过检波电路时与 Y 轴输入端的连接。
- 开路头适用于被测电路输入端为高阻抗时,扫频信号输出端与被测电路输入端的



连接。

- 输出探头（匹配头）适用于被测电路输入端具有  $75\Omega$  特性阻抗时，将扫频信号输出端与被测电路输入端相连。

## 5. 实验内容及步骤

（1）开机预热后，对仪器的主要性能进行检查。

（2）调节辉度、聚焦旋钮使图像清晰。调整有关开关旋钮使基线与扫描线重合，频标显示正常。将波段选择开关置于“Ⅰ”位置，选择中心频率为  $30\text{MHz}$ 、频带宽度为  $\pm 5\text{MHz}$ 。

将扫频电压输出端与  $75\Omega$  的匹配电缆连接，Y 轴输入端与检波器电缆连接，并把两根电缆探头直接相连。将 Y 轴衰减置于“Ⅰ”位置，调节 Y 轴增益旋钮至最大位置，调节输出衰减旋钮使曲线呈矩形，曲线幅度接近满刻度，记下此时曲线高度  $H$ （如  $5\text{DIV}$ ），记下输出衰减的分贝数  $B_1$ （如  $12\text{dB}$ ）。

（3）如图 A.4 所示连接电路，输出电缆探头接一个  $510\text{pF}$  左右的隔直电容后，再接到中频放大器的输入端。加隔直电容是为了防止影响放大器电路的偏置电压。带检波器电缆探头经  $1\text{k}\Omega$  隔离电阻接于中频放大器的输出端。连接隔离电阻可以减小检波器输入电容对调谐频率的影响。

（4）将 Y 轴衰减置于 10 挡（相当于衰减  $20\text{dB}$ ），调节粗、细输出衰减使因接入放大器而变化的曲线高度仍恢复为  $H$ （如  $5\text{DIV}$ ），记下输出衰减总分贝数  $B_2$ （如  $42\text{dB}$ ），则该中频放大器的电压增益  $A$  为

$$A(\text{dB}) = B_1 - B_2 + \text{Y 轴衰减分贝数}$$

（5）调节中频放大器的有关元件，使波形曲线如图 A.5 所示，利用扫频仪上的频标，可以很方便地确定被测电路的幅频特性曲线的频带宽度。该放大器的带宽为

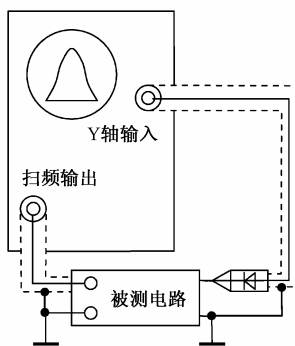


图 A.4 扫频仪与被测电路的连接

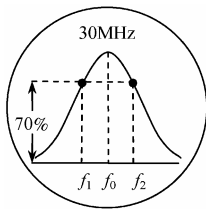


图 A.5 中频放大器带宽的测量

$$B = f_2 - f_1$$

（6）测试结果及误差分析，记录步骤（4）、（5）中的测试数据，然后计算增益  $A(\text{dB}) = B_1 - B_2 + \text{Y 轴衰减分贝数}$ ，计算带宽  $B = f_2 - f_1$ ，最后进行误差分析。本例中增益  $A$  的参考值为  $A = (42 - 12 + 20) \text{dB} = 50\text{dB}$ 。

## 6. 思考题

- （1）被测电路是否需要屏蔽？为什么？
- （2）造成误差的主要原因有哪些？怎样消除？



## A.8 频谱仪的使用

### 1. 实验目的

- 了解超外差频谱仪的工作原理和结构。
- 学会正确设置频谱仪的各项参数。
- 学会观测各种输入信号的频谱。

### 2. 实验预习要求

- 复习频域测量和频谱仪有关内容,熟悉频谱仪的工作特性与使用方法。
- 详细阅读实验指导书,了解频谱仪的操作方法和步骤。
- 写出实验预习报告。

### 3. 实验设备及器材

QF-4031 型频谱仪、YB-1634 型函数信号发生器各 1 台,信号连接电缆线 2 条。

### 4. 实验原理

#### (1) 频谱仪的工作原理

目前频谱仪的品种和数量较多,应用最广泛的是超外差频谱仪。超外差频谱仪利用超外差接收机原理,将频率可变的扫频信号与被分析信号进行差频,再对所得的固定频率信号进行测量分析,从而获得被测信号不同频率成分的幅度信息。超外差频谱仪实质上是一种具有扫频和窄带滤波功能的超外差接收机,与其他超外差接收机原理相似,只是用扫频振荡器作为本机振荡器,中频电路有频带很窄的滤波器,按外差方式选择所需频率分量。这样,当扫频振荡器的频率在一定范围扫动时,与输入信号中的各个频率分量在混频器中产生差频(中频),使输入信号的各个频率分量依次落入窄带滤波器的通带内,被滤波器选出并经检波器加到示波器的垂直偏转系统,即光点的垂直偏转正比于该频率分量的幅值。由于示波器的水平扫描电压就是调制扫频振荡器的调制电压(由扫描发生器产生),所以水平轴已变成频率轴,这时荧光屏上将显示出输入信号的频谱图。

#### (2) 频谱仪的操作

影响频谱仪频谱显示的因素有频率(横轴)、幅度(纵轴)两方面。

##### 1) 与频率显示有关的频谱仪指标

- 频率范围指频谱仪能够进行正常工作的最大频率区间。
- 扫描宽度表示频谱仪在一次测量(即一次频率扫描)过程中所显示的频率范围,可以小于或等于输入频率范围。通常根据测试需要自动调节或手动设置。
- 频率分辨率

频谱仪能够将最靠近的两个相邻频谱分量(两条相邻谱线)分辨出来的能力。频率分辨率主要由中频滤波器的带宽和选择性决定,但最小分辨率还受到本振频率稳定度的影响。

- 扫描时间进行一次全频率范围的扫描、并完成测量所需的时间。通常希望扫描时间越短越好,但为了保证测量精度,扫描时间必须适当。与扫描时间相关的因素主要有扫描宽度、分辨率带宽、视频滤波。
- 相位噪声相位噪声反映出的是频率在极短时间内的变化程度,表现为载波的边带。相位噪声由本振频率或相位不稳定引起,本振越稳定,相噪就越低;同时它还与分辨率





带宽 RBW 有关, RBW 缩小 10 倍, 相位噪声电平值减小 10dB。通过有效设置频谱仪, 相位噪声可以达到最小, 但无法消除。

## 2) 与频率显示有关的频谱仪功能设置键

- 频率扫描宽度 Span 用于设置当前测量的频率范围。
- 中心频率用于设置当前测量的中心频率。
- 分辨率带宽 RBW 用于设置分辨率带宽。RBW 的设置通常与 Span 联动。

## 3) 与幅度显示有关的频谱仪指标

- 动态范围同时可测的信号最大幅度与最小幅度之比。通常是指从不加衰减时的最佳输入信号电平起, 一直到最小可用的信号电平为止的信号幅度变化范围。
- 灵敏度频谱仪在没有输入信号的情况下因噪声而产生的读数。只有高于灵敏度的输入信号才能被检测出来。
- 参考电平频谱仪当前可显示的最大幅度值, 即荧光屏上顶格横线所代表的幅度值。

## 4) 与幅度显示有关的频谱仪功能设置键

- 纵坐标类型用于选择纵坐标类型是线性 (V、mV、 $\mu$ V 等) 还是对数 (dB、dBm、dBV、dB $\mu$ V 等)。
- 刻度/DIV 选定坐标类型之后, 用于选择每格代表的刻度值。
- 参考电平用于确定当前可显示的最大幅度值, 其单位与已选择的坐标类型相同。

## 5) 其他功能键

- 符号亮点 Marker 键开启 Marker 功能, 可以对显示迹线所对应的测量值进行多种标识, 如寻找峰值、相对测量等。寻找峰值是指把 Marker 指向迹线的幅度调至最大值处, 并显示该最大幅度值以及最大幅值点的频率值; 相对测量时, 使用 2 个 Marker 可以测量它们各自所在位置的幅度、频率差等。
- 保存键用于保存当前参数设置、测量结果以及荧光屏显示等各类数据, 并提供多种文本文件、ASCII 码文件、位图图片文件等保存方式。
- 输入键用于输入将要设置的数值, 如 Span、中心频率、RBW、参考电平等。可以使用数字、单位键, 也可以扭动旋钮连续调节。

# 5. 实验内容及步骤

(1) 观察如图 A.6 所示的频谱仪面板结构, 熟悉各开关旋钮的功能与使用方法。

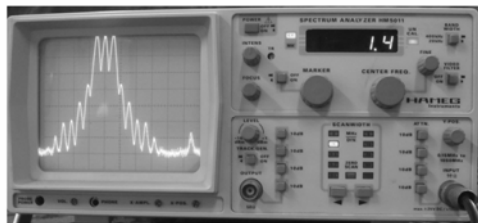


图 A.6 频谱仪的面板结构

(2) 接通频谱仪电源, 不连接任何电缆, 观察频谱仪的显示, 查看迹线的大致幅度值和默认的设置情况。

(3) 接通函数发生器电源, 调整有关开关旋钮使之输出某单一频率 (如 2MHz) 的连续

正弦波。

（4）将函数发生器的输出经电缆连接至频谱仪的射频输入端。设置频谱仪参数，包括：Span、中心频率、RBW、参考电平、纵坐标类型等，确保能够在荧光屏上看到幅度最大的谱线，如图 A.7 所示。

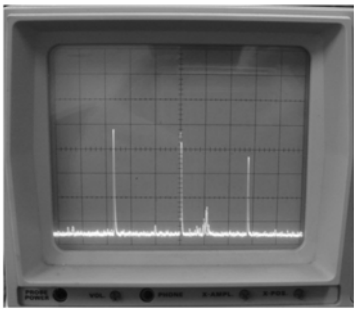


图 A.7 频谱仪显示的谱线

- （5）使用 Marker 功能，读出最大谱线的幅度、频率值。
- （6）记录相应的参数设置情况和测量结果，并将相应的数值填写在实验数据记录表 A-4 中。
- （7）改变信号发生器的输出波形，使之输出方波、三角波，重复步骤（4）、（5）。将相应测量结果记录在表 A-4 中。

表 A-4 A.8 实验用表

测量项目		正弦波		方波		三角波	
		2MHz	4MHz	2MHz	4MHz	2MHz	4MHz
最大谱线	频率						
	幅度						
谐波谱线 1	频率						
	幅度						
谐波谱线 2	频率						
	幅度						
谐波谱线 3	频率						
	幅度						

6. 思考题

- （1）信号的时域测量和频域测量是否相同？各有什么特点？两者之间有什么关系？
- （2）根据实验结果，比较正弦波、方波和三角波的频谱？

A.9 便携式直流平衡电桥的使用

1. 实验目的

- 进一步熟悉电桥的组成及其工作原理。
- 学会利用电桥测量元件的阻抗。



## 2. 实验预习要求

- 复习电桥法测量阻抗的有关内容，理解掌握电桥法测量阻抗的原理及其组成。
- 复习有关的内容，掌握色环电阻阻值的识读。
- 写出实验预习报告。

## 3. 实验器材设备

QJ23 型便携直流电桥、电阻箱、直流电源各 1 台（块），阻值为  $1\text{k}\Omega$ 、 $2\text{M}\Omega$  等色环电阻各 1 个。

## 4. 实验原理

电桥分为直流电桥和交流电桥，其测量原理是：当电桥平衡时，即指示器指示为“0”时，对臂复阻抗之积相等。所以只要其中三个桥臂的复阻抗已知，被测桥臂的复阻抗即可通过上述条件进行计算。QJ23 型便携电桥为直流电桥，只能测量直流电阻，电路原理如图 A.8 所示。

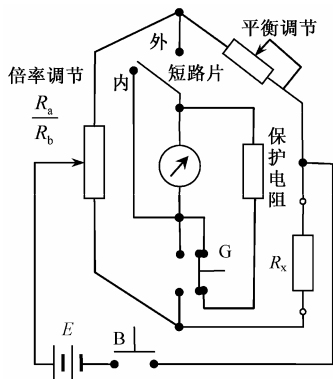


图 A.8 QJ23 型便携电桥电路原理图

## 5. 实验内容与步骤

(1) 调整直流电源输出为  $4.5\text{V}$ ，将电源输出端与电桥电源输入端相接。注意，此时不要将电桥的电源按钮 B 按下。

(2) 调节电阻箱输出  $1\text{k}\Omega$  阻值，并与电桥阻抗测量端  $R_x$  相接。

(3) 将电桥量程臂（即倍率臂）选为  $\times 1$ ，将平衡调节臂选为  $1\text{k}\Omega$ 。

(4) 将短路片由“内”接变为“外”接，按下并锁住 B 按钮接通  $4.5\text{V}$  的电源。

(5) 迅即按放电桥的 G 按钮（注意即按即放，以防电流过大损坏电流计），结合电流计的偏转情况适当调节量程臂和平衡调节臂的数值（指针向“-”偏转时，调小，反之，调大。），直至电桥平衡为止，此时满足以下关系：

被测电阻值 = 量程值（即倍率臂值） $\times$  平衡调节臂阻抗值（即比较臂值）。

(6) 改变电阻箱的阻值为  $1\text{M}\Omega$ ，重复步骤 (3) ~ (5)。注意，量程臂、平衡调节臂的数值要事先估算后进行选择，并使测量结果的有效数字位数最多。

(7) 将电阻箱分别替换为阻值为  $1\text{k}\Omega$  和  $2\text{M}\Omega$  的色环电阻，重复步骤 (3) ~ (5)。

(8) 测量完毕，整理仪器导线。注意恢复 B、G 按钮为断开状态，并将短路片恢复为“内”接。



## 6. 思考题

- (1) QJ23 型便携电桥能用来测量电容或电感吗？为什么？
- (2) QJ23 型便携电桥的测量范围是多少？分辨率又是多少？
- (3) 怎样才能使测量结果的有效数字位数最多？为什么要这样做？

## A.10 晶体管特性图示仪的使用

### 1. 实验目的

- 了解晶体管特性图示仪的组成及功能。
- 熟悉晶体管特性图示仪各开关旋钮的名称和作用。
- 学会利用晶体管特性图示仪观测二极管、三极管特性曲线。
- 学会利用晶体管特性图示仪判断二极管、三极管性能好坏。

### 2. 实验预习要求

- 复习晶体管特性图示仪有关内容，了解其组成与功能。
- 复习二极管、三极管有关内容，熟悉二极管伏安特性曲线、三极管输入、输出特性曲线，并根据特性曲线判断二极管、三极管性能好坏，以及估测二极管、三极管有关参数。
- 写出实验预习报告。

### 3. 实验器材设备

XJ4810 型晶体管特性图示仪 1 台，NPN 型三极管和 PNP 型三极管各 1 个。

### 4. 实验原理

晶体管特性图示仪简称为图示仪，是一种在荧光屏上直接显示各种晶体管、场效应管等的特性曲线、并据此测算出元器件各项参数的元器件测试仪器。

晶体管特性图示仪主要由阶梯波发生器、集电极扫描信号源、X-Y 方式示波器等部分组成。阶梯波信号源用来提供测试所需的各种基极阶梯电压或电流  $I_B$ 。集电极扫描电路使每一个固定  $I_B$  期间，集电极电压  $u_{CE}(t)$  作相应改变。

### 5. 实验内容与步骤

- (1) 熟悉 XJ4810 型晶体管特性图示仪面板结构图，了解各开关旋钮名称与作用。
- (2) 按下电源开关，预热 15 分钟后，调整如下开关旋钮。
  - ① 调节辉度、聚焦及辅助聚焦，使光点清晰。
  - ② 将峰值电压旋钮调至零，峰值电压范围、极性、功耗电阻等开关置于测试所需位置。
  - ③ 对 X、Y 轴放大器进行 10 度校准。校准方法是：先将光点移到荧光屏左下角，然后按下校准键，此时光点应同时向上和向右移动十格到达荧光屏的右上角。
  - ④ 调节阶梯调零。未测试前，应先调整阶梯信号起始级，零电平的位置。当荧光屏上已经观察到基极阶梯信号后，按下测试台上选择按键的“零电压”按钮，观察光点在荧光屏上的位置，复位后调节调零旋钮，使阶梯信号的起始级光点仍在该处，这样阶梯信号的“零电位”即被准确校正。



⑤ 选择需要的基极阶梯信号，将极性、串联电阻置于合适挡位，调节级/簇旋钮，使阶梯信号为 10 级/簇，阶梯信号按钮置于重复位置。

(3) 插入被测晶体管（NPN 型晶体管），调整开关旋钮至如表 A-5 所示位置，将光点移到荧光屏的左下角作为坐标零点。

表 A-5 XJ4810 型晶体管特性图示仪开关旋钮位置

开关旋钮名称	开关旋钮位置	开关旋钮名称	开关旋钮位置
峰值电压范围	0~10V	Y 轴集电极电流	1mA/度
极性	+	阶梯信号	重复
功耗电阻	250Ω	阶梯极性	+
X 轴集电极电压	1V/度	阶梯选择	10μA/度

- (4) 逐渐加大峰值电压直到在显示屏上得到一簇特性曲线，测出三极管  $h_{FE}$ 。
- (5) 将 X 选择开关置于基极电流位置，得到电流放大特性曲线，测出三极管  $\beta$ 。
- (6) 改变三极管类型重复步骤 (4)、(5)，注意改变扫描电压极性、阶梯信号极性，并把光点移至荧光屏右上角。
- (7) 调整有关开关旋钮为测量晶体三极管击穿电压  $BU_{CBO}$  和  $BU_{CEO}$  做准备，然后逐步调高峰值电压。
- (8) 分别将被测管正确插入插座中，测量  $BU_{CBO}$  和  $BU_{CEO}$ 。
- (9) 改变三极管类型重复步骤 (7)、(8)。
- (10) 测量完毕，整理仪器设备，填写实验记录。

6. 注意事项

- (1) 应特别注意阶梯信号选择、功耗限制电阻、峰值电阻范围旋钮的使用，如果使用不当会损坏被测晶体管。
- (2) 测试大功率晶体管和极限参数、过载参数时，应采用单簇阶梯信号，以防过载损坏被测器件。
- (3) 测试 MOS 型场效应管时，应特别注意不要使栅极悬空，以免感应电压过高击穿被测管。
- (4) 测试完毕后，使仪器复位，以防下次使用时因疏忽而损坏被测器件。此时应将“峰值电压范围”置于 (0~10V) 挡，“峰值电压调节”旋到零位，阶梯信号选择开关置于关挡，“功耗限制电阻”置于 10kΩ 以上位置。

7. 思考题

- (1) 根据 XJ4810 型晶体管特性图示仪面板图，说明它由哪几部分组成？试根据课本内容画出其组成简图。
- (2) 简要说明怎样用晶体管特性图示仪判断二极管、场效应管特性？

A.11 电子计数器的使用

1. 实验目的

- 熟悉电子计数器的测量原理及其组成。
- 明确电子计数器的测量项目。
- 学会用电子计数器测量信号的频率、周期，了解其累加计数、自检等功能。

2. 实验预习要求

- 复习电子计数器有关内容，明确电子计数器的组成，理解掌握电子计数器的测量原理。
- 写出实验预习报告。

3. 实验器材设备

NFC-100 型通用电子计数器、信号发生器、毫伏表、秒表、示波器（可选）各 1 台（块），配套测试线若干条。

4. 实验原理

通用电子计数器可以用来测量信号的频率、周期，可实现累加计数、自检等功能。电子计数器主要由闸门电路、门控电路、被测信号处理通道、标准信号处理通道、计数显示等电路组成。电子计数器的测量原理是闸门开启时间与累计脉冲个数和脉冲周期的乘积相等。控制闸门开启时间的信号和用于产生计数脉冲的信号可根据测量物理量的不同进行变换。

5. 实验内容与步骤

- (1) 熟悉电子计数器面板上的开关旋钮。
- (2) 将电子计数器的输入与输出相连，按下自检按钮“CHK”进行自检。根据实验显示结果，验证表 A-6 是否正确。

表 A-6 A.11 实验用表 1

闸门时间	显示数字 (kHz) ——10MHz
10ms	10000.0
0.1s	10000.00
1s	10000.000
10s	(溢出指示灯亮) 0000.0000

- (3) 调整信号发生器使之输出 10kHz 正弦波，并与电子计数器的输入端相接，利用电子计数器测量正弦波信号的频率，填表 A-7。

表 A-7 A.11 实验用表 2

闸门时间 $T$	显示结果 (kHz)	测频量化误差 $\frac{\Delta N}{N} \times 100\%$
10ms		
0.1s		
1s		
10s		



（4）分别调整信号发生器使之输出 200kHz、100Hz 的正弦波，并与电子计数器的输入端相接，利用电子计数器测量信号的周期，填表 A-8。

表 A-8 A.11 实验用表 3

周期倍乘	200kHz 显示结果（ $\mu\text{s}$ ）	100Hz 显示结果（ $\mu\text{s}$ ）
1		
10		
100		
1000		

（5）累加计数，分别调整信号发生器输出 10Hz 的方波（通过测量频率的方法事先测量），用秒表或其他计时器计时 30s。测量 5 次求平均，并将结果（平均值）填入表 A-9。

表 A-9 A.11 实验用表 4

信号	结果（5 次测量求平均）
10Hz 方波	

（6）实验完毕，整理实验器材设备，填写实验记录。

6. 注意事项

（1）电子计数器测频、测周时，被测信号一定不能太小，否则，由于计数器灵敏度的限制，而不能正确显示结果。

（2）由于存在量化误差，测量显示出现 $\pm 1$  字的改变是正常的。

7. 思考题

- （1）根据实验结果，判断说明电子计数器的位数是多少？
- （2）闸门时间、周期倍乘的改变是怎样实现的？各自改变什么用途的信号？

A.12 放大电路部分指标的测量

1. 实验目的

- 进一步熟悉示波器、电压表、信号发生器等仪器的工作原理及使用方法。
- 学会放大电路静态工作点的调整及幅频特性曲线、频带宽度、输入信噪比的测量。

2. 实验预习要求

- 复习放大电路工作状态的测试调整方法，明确怎样调整得到最大不失真电压。
- 复习放大电路有关动态指标的定义。
- 写出实验预习报告。

3. 实验器材设备

直流稳压电源、示波器、信号发生器、毫伏表、万用表各 1 台（块），放大电路板 1 块，配套测试线若干条。

4. 实验原理

放大电路对不同频率输入信号的放大特性不同，该特性可以利用幅频特性曲线来表示；在放大电路幅频特性曲线中，电压放大器倍数  $A_V$  变为  $0.707A_{V0}$  时对应的两个频率的差就是放大电路的频带宽度。 $A_{V0}$  为放大电路幅频特性曲线内中心频率对应的电压放大倍数。电压增益是中心频率增益的  $1/\sqrt{2}$ ，此时所对应的频率差为放大电路的频带宽度。

放大电路输入信号中夹杂着干扰信号，为了描述其中干扰信号的大小，通常利用信噪比来描述，即信噪比  $S/N = 20\lg \frac{U_s}{U_n}(\text{dB})$ ，其中  $U_s$ 、 $U_n$  分别为输入端的有用信号和噪声信号大小。

5. 实验内容与步骤

(1) 如图 A.9 所示连接电路，调节信号发生器使之输出频率为 1kHz 的正弦波，利用示波器、万用表调整放大电路的动态工作点，使放大电路输出端得到最大的不失真电压。稍调小输入信号，并利用毫伏表测出该输入信号的大小  $U_{i1}$ 。

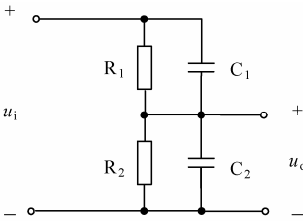


图 A.9 A.12 实验连接图

- (2) 利用毫伏表测出放大电路输出电压  $U_o$ ，记录此时信号发生器输出信号的频率  $f_i$ 。
- (3) 逐渐改变信号发生器输出信号频率，分别用毫伏表测出放大电路输出电压的大小，填表 A-10，表中频率可选用。

表 A-10 A.12 实验用表

$U_{i1}(\text{mV})$										
$f_i(\text{Hz})$	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800
$U_o(\text{mV})$										
$A_V(\text{dB})$										
$f_i(\text{Hz})$	1k	3k	7k	15k	20k	25k	30k	40k	50k	60k
$U_o(\text{mV})$										
$A_V(\text{dB})$										
$f_i(\text{Hz})$	70k	80k	90k	100k	150k	200k	300k	400k	500k	600k
$U_o(\text{mV})$										
$A_V(\text{dB})$										

- (4) 按上述表格测出的数据，在方格纸上描画出放大电路幅频特性曲线。根据画出的特性曲线计算放大电路 3dB 带宽。
- (5) 拆除放大电路与信号发生器的连接，将放大电路的输入端短路，利用毫伏表测出放





大电路此时输出信号（即干扰信号）的大小  $U_n$  ( $U_n=1.13U_a$ ,  $U_a$ 为毫伏表读数), 并利用示波器观察显示出的波形。注意, 将手臂等远离测试设备以免对测量结果产生影响, 应将多次测量求平均的结果作为干扰信号大小  $U_n$ 。

(6) 计算放大电路输入信噪比  $\frac{S}{N} = 20 \lg \frac{U_s}{U_n} (\text{dB})$ , 其中  $U_s$  为放大电路输入 1kHz 正弦波大小。

## 6. 思考题

- (1) 怎样利用示波器调整放大电路使之输出不失真最大波形?
- (2) 如何在幅频特性曲线上估算放大电路的带宽?

## 附录B 课程设计指导书——数字电压表课程设计

数字电压表的基本原理是对直流电压进行 A/D 变换, 并以数字形式将电压测量结果显示出来。数字电压表按其基本工作原理分为积分式和比较式两大类, 比较常见的是积分式数字电压表。

### 1. 设计目的

- (1) 理解、掌握数字电压表的组成及工作原理。
- (2) 掌握数字电压表的设计、组装与调试方法。
- (3) 了解集成电路 MC14433, MC1413, CD4511 和 MC1403 的功能、工作原理与使用方法。

### 2. 设计内容与要求

- (1) 设计数字电压表电路。
- (2) 测量范围: 直流电压 0~1.999V, 0~19.99V, 0~199.9V, 0~1999V。
- (3) 组装调试  $3\frac{1}{2}$  位数字电压表。
- (4) 画出数字电压表电路原理图, 写出总结报告。
- (5) 选做内容: 自动切换量程。

### 3. 设计器材设备（参考）

±5V 直流电源、双踪示波器、直流数字电压表、万用表各 1 台（块），十字形螺丝刀、一字形螺丝刀、电烙铁各 1 把，MC14433（或 5G14433）、CD4511（或 5G4511）、MC1413（或 5G1413）、MC1403（或 5G1403）各 1 片，晶体三极管 9013、印制板各 1 个（块），七段共阴 LED 数码管 4 个，电阻、电容、导线、焊锡丝若干。

### 4. 数字电压表基本工作原理

数字电压表是将被测模拟量变换为数字量, 并进行实时数字显示的数字测量仪表。

#### (1) 数字电压表的组成

如图 B.1 所示, 数字电压表可由 MC14433 ( $3\frac{1}{2}$  位 A/D 变换器)、MC1413 七路达林顿驱



动器阵列、CD4511BCD 码七段锁存译码驱动器、高精度基准电源 MC1403 和共阴极 LED 发光数码管组成。

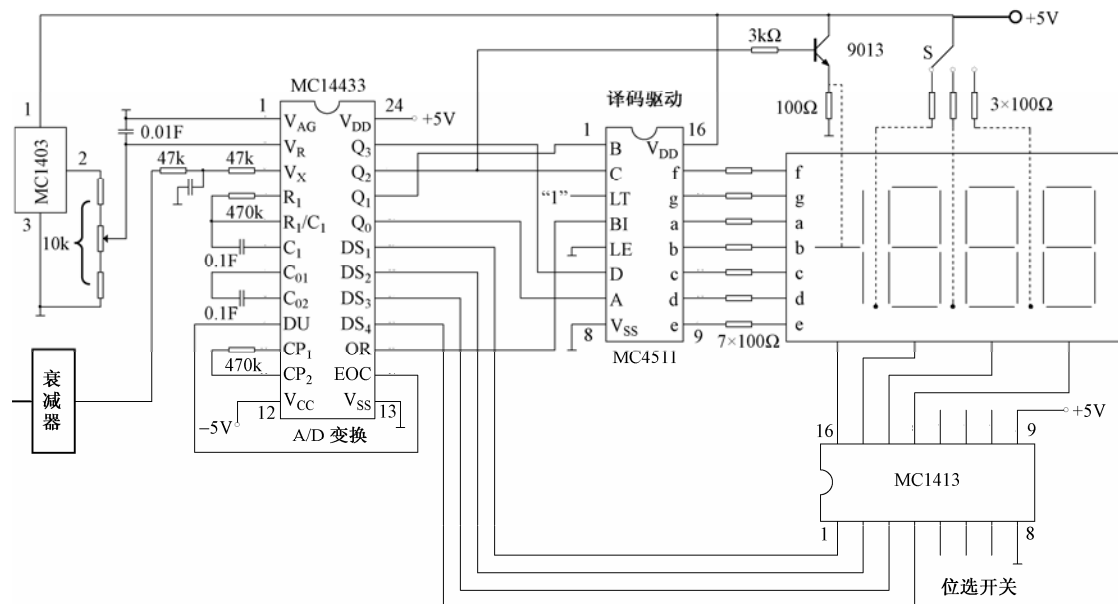


图 B.1 数字电压表组成框图

### 1) $3\frac{1}{2}$ 位 A/D 变换器——MC14433

MC14433 是 CMOS 双积分式  $3\frac{1}{2}$  A/D 变换器。具有外接元件少，输入阻抗高，功耗低，电源电压范围宽，精度高等特点，并具有自动校零和自动极性变换功能，可以测量正电压或负电压。只要外接少量的阻容元件即可构成一个完整的 A/D 转换器。广泛应用于数字温度计、数字万用表、数字量具及遥测、遥控系统。

MC14433 引脚排列与功能如图 B.2 所示。

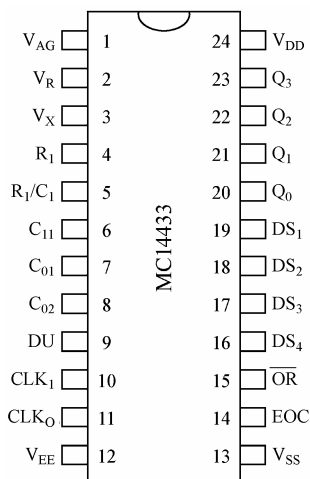


图 B.2 MC14433 引脚图



- $V_{AG}$  (1脚) 输入电压  $V_X$  和基准电压  $V_R$  的参考地。
- $V_R$  (2脚) 外接基准电压 (2V 或 200mV) 输入端。MC14433 只要一个正基准电压即可测量正、负极性电压。
- $V_X$  (3脚) 被测电压输入端。当满量程选为 1.999V,  $V_R$  可取 2.000V; 当满量程为 199.9mV 时,  $V_R$  可取 200.0mV。在实际应用电路中,  $V_R$  可在 200mV~2.000V 之间选取。
- $R_1$  (4脚) 外接积分电阻  $R_1$  的连接端。
- $R_1/C_1$  (5脚) 外接积分电阻  $R_1$  和积分电容  $C_1$  的公共连接端。
- $C_1$  (6脚) 外接积分电容  $C_1$  的连接端。一般选  $C_1$  为 0.1 $\mu$ F 聚酯薄膜电容。如果需每秒变换 4 次, 时钟频率选为 66kHz, 在 2.000V 满量程时, 电阻  $R_1$  约为 470k $\Omega$ , 而满量程为 200mV 时,  $R_1$  取 27k $\Omega$ 。
- $C_{01}$  (7脚),  $C_{02}$  (8脚) 外接失调补偿电容连接端。一般选取 0.1 $\mu$ F 聚酯薄膜电容。
- DU (9脚) 实时显示控制输入端。如果 DU 与 EOC (14脚) 连接, 则每次 A/D 变换均有显示。
- $CP_1$  (10脚),  $CP_0$  (11脚) 时钟振荡信号外接电阻端。MC14433 内置了时钟振荡电路, 对于时钟频率要求不高的场合, 选择一个电阻即可设定时钟频率。时钟频率为 66kHz 时, 外接电阻取 470k $\Omega$ 即可, 每秒钟可进行 4 次 A/D 变换。
- $V_{EE}$  (12脚) 电路的电源最负端, 接 -5V。
- $V_{SS}$  (13脚) 除 CP 外所有输入端的低电平基准, 通常与 1 脚连接。
- EOC (14脚) A/D 变换周期结束标志输出端。每一次 A/D 变换周期结束时, EOC 端输出一个正脉冲信号, 其脉宽为时钟信号周期的  $\frac{1}{2}$ 。
- $\overline{OR}$  (Over Range) (15脚), 过量程标志输出端。当  $|V_X| > V_R$  时,  $\overline{OR}$  端输出低电平。
- $DS_4 \sim DS_1$  (16脚~19脚) 多路选通脉冲输出端。 $DS_1$ 、 $DS_2$ 、 $DS_3$  和  $DS_4$  分别是千位、百位、十位、个位的选通信号, 选通信号高电平有效。
- $Q_0 \sim Q_3$  (20脚~23脚) 8421 码数据输出端。 $Q_0 \sim Q_3$  分别是 A/D 变换结果数据输出 8421 码的最低位 (LSB, Least Significant Byte)、次低位、次高位和最高位 (MSB, Most Significant Bit) 输出端。 $DS_2$ ,  $DS_3$ ,  $DS_4$  选通脉冲期间, 输出三位完整的十进制数; 在  $DS_1$  选通脉冲期间, 输出千位 0 或 1 及过量程、欠量程和被测电压极性标志信号。
- $V_{DD}$  (24脚) 正电源电压端。

## 2) 七段锁存—译码—驱动器 CD4511

CD4511 是专用于将 8421 码转换成七段显示信号的标准译码器, 并兼有消隐控制、锁存控制与驱动功能, 内部设有限流电阻。与数码管相连接时, 需要在每段输出接上限流电阻。

图 B.3 (a) 所示为 CD4511 内部组成框图, 主要由 4 位锁存器、7 段译码器和驱动器组成。A、B、C、D 为 CD4511 的 8421 码输入, a~g 为 CD4511 的 7 段显示信号输出, LE (Latch Enable) 为锁存允许端,  $\overline{LT}$  (Lamp Test) 为灯测试端,  $\overline{BI}$  (Blanking) 为消隐端。

图 B.3 (b) 为 CD4511 引脚图, 表 B-1 为其真值表。各引脚功能如下:

表 B-1 CD4511 真值表

十进制数或功能	输 入						$\overline{\text{BI}}$	输 出							显示字符
	LE	$\overline{\text{LT}}$	D	C	B	A		a	b	c	d	e	f	g	
0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1
2	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	2
3	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	3
4	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	4
5	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	5
6	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	6
7	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
8	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
9	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	9
消隐	×	1	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	消隐
锁存	1	1	×	×	×	×	1	锁定上一个 LE=0 时的输出							锁定
灯测试	×	0	×	×	×	×	×	1	1	1	1	1	1	1	8

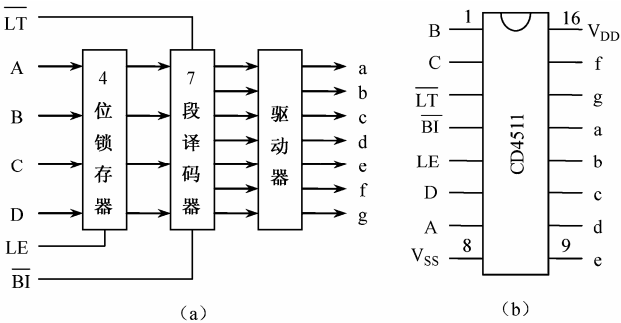


图 B.3 CD4511 内部组成框图与引脚图

- A (7 脚)、B (1 脚)、C (2 脚)、D (6 脚) 8421 码输入端，它们分别是 8421 码的最低位、次低位、次高位和最高位。
- a (13 脚)、b (12 脚)、c (11 脚)、d (10 脚)、e (9 脚)、f (15 脚)、g (14 脚) 7 段译码输出 (显示信号) 端，输出高电平 1 有效。注意，CD4511 输出端不允许短路，需外接限流电阻。
- LE (Latch Enable) (5 脚) 锁存允许控制端。当 LE=0 时，4 位锁存器处于选通状态，允许译码输出，它的输出为输入 BCD 码的译码输出。当 LE=1 时，译码器处于锁定保持状态，它的输出被保持在前一次 LE=0 时的输出。
- $\overline{\text{BI}}$  (Blanking) (4 脚) 消隐输入控制端。当  $\overline{\text{BI}}=0$  时，不管其他输入端状态如何，七段显示输出均为 0，数码管处于熄灭 (消隐) 状态，不显示数字。
- $\overline{\text{LT}}$  (Lamp Test) (3 脚) 为灯测试输入端，用于检测数码管是否损坏。当  $\overline{\text{BI}}=1$ ， $\overline{\text{LT}}=0$  时，译码输出全为 1，不管输入的 8421 码状态如何，七段输出均为高电平，数码管显示“8”。
- $V_{\text{DD}}$  (16 脚) CD4511 电源电压  $V_{\text{DD}}$  范围为 5~15V，可与 NMOS 电路或 TTL 电路兼



容工作。

### 3) 七路达林顿驱动器阵列 MC1413

MC1413 采用 NPN 达林顿复合晶体管的结构, 因此具有很高的电流增益和很高的输入阻抗, 可直接接受 MOS 或 CMOS 集成电路的输出信号, 并把电压信号变换成足够大的电流信号驱动各种负载。该电路内含有 7 个集电极开路反相器 (OC 门, Open Collector), 每一个驱动器输出端均接有一个释放电感负载能量的抑制二极管, 内部电路结构图和引脚图如图 B.4 所示。

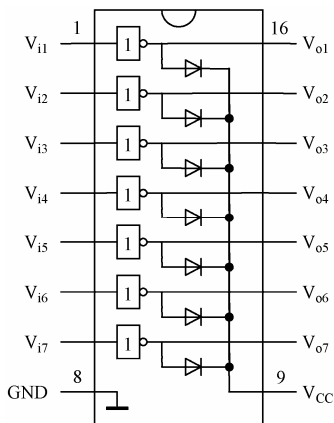


图 B.4 MC1413 内部电路结构图与引脚

### 4) 高精度低漂移基准电源 MC1403

MC1403 的输出电压  $V_o$  的温度系数为零, 即输出电压与温度无关。该电路的特点是: 温度系数小、噪声小、输入电压范围大, 稳定性好。当输入电压从 +4.5V 变化到 +15V 时, 输出电压值变化量  $\Delta V_o < 3\text{mV}$ ; 输出电压准确度较高,  $V_o$  值在 2.475~2.525V 以内。MC1403 引脚图如图 B.5 所示。

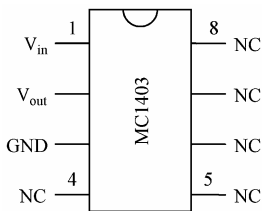


图 B.5 MC1403 引脚图

## (2) 数字电压表的工作原理

数字电压表的电路组成框图如图 B.1 所示, 基本工作原理如下:

① 被测直流电压  $V_X$  经衰减器衰减后, 再经 A/D 变换后以动态扫描形式按照时间先后顺序输出数字量  $Q_0 \sim Q_3$  (8421 码)。位选信号  $DS_1 \sim DS_4$  通过位选开关 MC1413 分别控制千位、百位、十位和个位的四只 LED 数码管的公共阴极。数字信号经七段译码器 MC4511 译码后, 驱动四只 LED 数码管的各段阳极。这样就把 A/D 变换器按时间顺序输出的数据以扫描方式依次显示出来, 由于选通重复频率较高, 工作时从高位到低位以每位每次约  $300\mu\text{s}$  的速率循



环显示,即一个四位数的显示周期为  $1.2\text{ms}$ ,所以能够清晰地看到四位数码管同时显示  $3\frac{1}{2}$  十进制数字量。

② 改变衰减器的衰减比可实现量程变换。注意,衰减器的输出不能超过  $2\text{V}$ ,而且小数点 DP (Decimal Point) 位置的变换,即开关 S 的变换与量程同步。

③ 最高位(千位)显示时只有 b、c 两条线与 LED 数码管的 b、c 脚连接,所以千位只显示 1 或不显示。用千位的 g 段显示模拟量的负值(正值不显示),即由 MC14433 的  $Q_2$  端通过 NPN 型三极管 9013 控制 g 段。

④ A/D 变换器需要外接标准电压源作参考电压,标准电压源的精度应高于 A/D 变换器的精度。本设计采用 MC1403 集成精密稳压源作为参考电压,MC1403 的输出电压为  $2.5\text{V}$ ,当输入电压在  $4.5\sim 15\text{V}$  范围内变化时,输出电压的变化不超过  $3\text{mV}$ ,一般只有  $0.6\text{mV}$  左右,输出最大电流为  $10\text{mA}$ 。

⑤ 由正电源通过限流电阻点亮小数点。若量程不同则选通对应的小数点。

⑥ MC14433 的  $\overline{\text{OR}}$  端与 MC4511 的消隐端  $\overline{\text{BI}}$  直接相连,当  $V_X$  超出量程范围时, $\overline{\text{OR}}$  输出低电平,即  $\overline{\text{OR}}=0$ ,MC4511 译码器输出全 0,使发光数码管显示数字熄灭,而负号和小数点依然点亮。

## 5. 调试要点

(1) 加电源电压  $V_{\text{DD}}=+5\text{V}$ ,  $V_{\text{EE}}=-5\text{V}$ 。

(2) 用示波器观察 MC14433 的 11 脚  $f_{\text{CP}}$  时钟频率。调整电阻  $R_1$ ,使  $f_{\text{CP}}=66\text{kHz}$ 。

(3) 采用稳压电源,调整其输出电压为  $1.999\text{V}$  或  $199\text{mV}$ ,以此作为模拟量输入信号  $V_X$ ,此值需用标准数字电压表监视,然后调整基准电压  $V_R$  的电位器,使 LED 数码管显示为  $1.999\text{V}$  或  $199\text{mV}$ ,最后将电位器值固定好。

(4) 观察 MC14433 第 6 脚处的积分波形。调整电阻  $R_1$  的值使  $V_X$  为  $1.999\text{V}$  或  $199\text{mV}$  时,积分器输出既不饱和,又能得到最大不失真的摆幅。

(5) 检查自动调零功能。当 MC14433 的端子  $V_X$  与  $V_{\text{AG}}$  短路或  $V_X$  端没有信号输入时,LED 数码管应显示 0000。

(6) 检查超量程溢出功能。调节  $V_X$  值,当  $V_X$  为  $2\text{V}$  (或  $|V_X|>V_R$ ),观察 LED 数码管有无闪烁显示告警作用,此时  $\overline{\text{OR}}$  端应为低电平。

(7) 检查自动极性转换功能。将  $+1.990\text{V}$  和  $-1.990\text{V}$  先后加到  $V_X$  端,两次读数之差为翻转误差,根据规定,正负极性变换时允许个位有  $\pm 1$  字的误差。

(8) 测试线性度误差。将输入信号  $V_X$  从  $0\text{V}$  增大到  $1.999\text{V}$ , $V_X$  用标准数字电压表监视,并与 LED 数码管显示数值进行比较,其最大偏差为线性误差。

(9) 将信号电压  $V_X$  极性变反,重复步骤 (8)。

(10) 当 MC14433 的 9 脚与 14 脚直接相连时,观察有无 EOC 信号。当 DU 端置“0”时,观察 LED 显示数字是否锁存。

(11) 调试衰减器(分压器),检查各量程是否准确。



## 6. 课程设计报告内容与格式要求

### （1）封面

- ① 题目
- ② 年级、姓名、学号
- ③ 指导教师
- ④ 时间

### （2）目录

### （3）序言

### （4）正文

#### ① 方案论证与设计

- 系统原理框图（含工作原理介绍）
- 主要电路设计与参数计算（各单元电路）
- 总体电路图（器件型号、元件参数应标出）

#### ② 调试步骤、要点与难点

#### ③ 测试数据及实验结果

#### ④ 结论

- 本方案特点及存在的问题
- 功能扩展方案（仅作理论讨论）

#### ⑤ 本作品使用说明

## 参 考 文 献

1. 郑家祥, 傅崇伦. 电子测量基础. 北京: 国防工业出版社, 1981
2. 申业刚. 电子测量. 北京: 电子工业出版社, 1986
3. 魏岫崑, 姜邈, 吴秀珍. 电子测量仪器. 天津: 天津科学技术出版社, 1986
4. [美]约翰 D 林克著, 李耀田, 李诵雪译. 电子学测量仪表手册(理论与应用). 北京: 北京科学技术出版社, 1987
5. 蒋焕文, 孙续. 电子测量. 北京: 中国计量出版社, 1988
6. 李永敏. 检测仪器电子电路. 西安: 西北工业大学出版社, 1994
7. 张永瑞, 刘振起, 杨林耀, 顾玉昆. 电子测量技术基础. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994
8. 管致中等. 电子测量仪器实用大全. 南京: 东南大学出版社, 1995
9. 陆希明. 电子元件测量与仪表. 北京: 电子工业出版社, 1995
10. 万象. 电子测量与仪器. 北京: 中国劳动出版社, 1995
11. 冯占岭. 数字电表检测技术. 北京: 人民邮电出版社, 1996
12. 张乃国, 廉有林. 实用电子测量技术. 北京: 电子工业出版社, 1996
13. 郭仁, 张士鹏, 刘达玮. 无线电测量. 北京: 中国广播电视出版社, 1998
14. 赵茂泰. 智能仪器原理及应用. 北京: 电子工业出版社, 1999
15. 李明生, 刘伟. 电子测量仪器与应用. 北京: 电子工业出版社, 2000
16. 卢文科. 实用电子测量技术及其电路精解. 北京: 国防工业出版社, 2000
17. 宋启峰. 电子测量技术. 重庆: 重庆大学出版社, 2000
18. 王敏升等译. LabVIEW 基础教程. 北京: 电子工业出版社, 2002
19. 肖晓萍. 电子测量仪器. 北京: 电子工业出版社, 2002
20. 刘国林, 殷贯西. 电子测量. 北京: 机械工业出版社, 2003
21. [美]Robert H. Bishop 著, 乔瑞萍, 林欣译. LabVIEW 6i 实用教程. 北京: 电子工业出版社, 2003
22. 杨乐平, 李海涛, 肖凯, 杨磊. 虚拟仪器技术概论. 北京: 电子工业出版社, 2003
23. 方彦军, 孙健. 智能仪器技术及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2004
24. 高吉祥. 电子技术基础实验与课程设计. 北京: 电子工业出版社, 2005
25. 古天祥, 王厚军等. 电子测量原理. 北京: 机械工业出版社, 2006